

Aus der Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie
des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Der Effekt rotierender Nickel-Titan Systeme auf die
Wurzelkanalgeometrie im Vergleich zur manuellen
Aufbereitung mit Edelstahlfeilen. Eine In-vitro-Untersuchung**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Juliane Vaudt

aus Lutherstadt Wittenberg

Gutachter: 1. Prof. Dr. A. M. Kielbassa
2. Prof. Dr. A. M. Schmidt-Westhausen
3. Prof. Dr. E. Schäfer

Datum der Promotion: 20.11.2009

Anzeige einer Publikation

Vaudt J., Bitter K., Neumann K., Kielbassa A. M.: "Ex vivo study on root canal instrumentation of two rotary nickel-titanium systems in comparison to stainless steel hand instruments." Int Endod J, 2009; 42: 22-33

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie wurden auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ) am 24.11.2007 in Düsseldorf präsentiert:

Vaudt J, Bitter K, Neumann K, Kielbassa AM. Effekt rotierender NiTi-Systeme auf die Wurzelkanalgeometrie im Vergleich zur manuellen Aufbereitung. Dtsch Zahnärztl Z 2007;62(Supplement):D19.

Widmung

Meinen Eltern und Großeltern

Inhaltsverzeichnis

1.	<i>Einleitung</i>	1
2.	<i>Literaturübersicht</i>	3
2.1	<i>Ziele der Wurzelkanalbehandlung</i>	3
2.2	<i>Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung</i>	4
2.2.1	<i>Entwicklung</i>	4
2.2.2	<i>Eigenschaften der Nickel-Titan-Instrumente</i>	5
2.2.3	<i>Konstruktionsmerkmale</i>	8
2.3	<i>Parameter der Wurzelkanalbehandlung</i>	12
2.3.1	<i>Formgebung</i>	12
2.3.2	<i>Reinigungswirkung</i>	14
2.3.3	<i>Arbeitssicherheit</i>	17
3.	<i>Ziel der Arbeit und Arbeitshypothese</i>	20
4.	<i>Material und Methoden</i>	21
4.1	<i>Auswahl der Zähne</i>	21
4.2	<i>Muffelsystem</i>	21
4.3	<i>Herstellung der Probekörper</i>	23
4.4	<i>Vorbereitung der Proben für die Wurzelkanalaufbereitung</i>	25
4.5	<i>Aufbereitung der Wurzelkanäle</i>	28
4.6	<i>Bestimmung der Instrumentierungszeit und Frakturnrate</i>	31
4.7	<i>Anfertigung und Auswertung der Röntgenbilder</i>	31
4.8	<i>Anfertigung und Auswertung der Wurzelkanalquerschnitte</i>	34
4.9	<i>Statistische Auswertung</i>	37
5.	<i>Ergebnisse</i>	38
5.1	<i>Apikale Wurzelkanalbegradigung</i>	38
5.2	<i>Prozentualer Anteil nicht bearbeiteter Kanalwand</i>	40
5.3	<i>Instrumentierungszeit</i>	41
5.4	<i>Frakturnrate</i>	41
6.	<i>Diskussion</i>	42
6.1	<i>Diskussion von Material und Methode</i>	42
6.2	<i>Diskussion der Versuchsergebnisse</i>	45
6.2.1	<i>Begradigung</i>	45

6.2.2	<i>Unbearbeitete Wurzelkanalwandbereiche</i>	49
6.2.3	<i>Instrumentierungszeit</i>	51
6.2.4	<i>Frakturnrate</i>	53
7.	<i>Schlussfolgerungen</i>	56
8.	<i>Zusammenfassung</i>	57
9.	<i>Abstract</i>	59
10.	<i>Literaturverzeichnis</i>	61
11.	<i>Anhang</i>	67
11.1	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	68
11.2	<i>Liste der verwendeten Materialien</i>	69
11.3	<i>Danksagung</i>	70
11.4	<i>Lebenslauf</i>	71
11.5	<i>Eidesstattliche Erklärung</i>	72

1. Einleitung

Die Wurzelkanalbehandlung ist eine der ältesten Therapiemaßnahmen in der Zahnerhaltung mit dem obersten Ziel der Schmerzbefreiung bei akuten Pulpitiden und apikalen Parodontitiden unter langfristigem Erhalt des erkrankten Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit.

Bis zum 19. Jahrhundert blieb die Therapie von Zahnschmerzen im Wesentlichen auf das Trepanieren, Kauterisieren und die medikamentöse Einlage in das Pulpakavum begrenzt [Hülsmann 1996]. Mitte des 19. Jahrhunderts rückte jedoch die instrumentelle Bearbeitung des Wurzelkanalsystems in den Fokus des Interesses und fortschreitende Erkenntnisse in der Mikrobiologie führten zur Änderung bisher bestehender Behandlungskonzepte. Im Jahr 1974 formulierte *Schilder* mit der Formgebung und Reinigung sowie Desinfektion des endodontischen Hohlraumes die Hauptziele der Wurzelkanalaufbereitung, und die mechanische Aufbereitung des Wurzelkanalsystems wurde als entscheidender Schritt für den dauerhaften Therapieerfolg gesehen [Schilder 1974].

Mit dem Ziel, den zeitraubenden und mühsamen Arbeitsgang der Aufbereitung mit Handinstrumenten zu erleichtern, wurden seit Beginn des 20. Jahrhunderts maschinell betriebene Instrumente entwickelt und spezielle Endodontie-Winkelstücke vorgestellt. Die Palette der Hilfsmittel reicht heute von den unterschiedlichsten maschinellen Aufbereitungssystemen bis hin zu Ultraschall- und Schallvibrationssystemen. Auch die Anwendung von Lasersystemen wurde vor einigen Jahren eingeführt. Seit einiger Zeit konzentriert sich die Diskussion auf die Nickel-Titan-Instrumente (NiTi-Instrumente), die zunächst für den manuellen Gebrauch gedacht waren, jedoch mittlerweile hauptsächlich in Endodontiewinkelstücken eingespannt ihren Einsatz finden. Mit der Einführung der Nickel-Titan-Legierung, die hochflexibel und zugleich widerstandsfähig ist, erhoffte man sich, die bis dahin bestehenden Probleme in der Aufbereitung und Formgebung des Wurzelkanals beseitigen zu können [Walia et al. 1988]. Diese bestanden in der apikalen Trichterbildung, der sanduhrförmigen Aufbereitung und der Verlagerung des Wurzelkanals sowie in apikalen Blockaden mit überstopftem Debris und Perforationen.

Viele der entwickelten Aufbereitungssysteme sind bereits in Studien hinsichtlich ihrer Formgebung, Reinigungswirkung, Arbeitssicherheit sowie -zeit evaluiert worden [Guelzow et al. 2005; Schirrmeister et al. 2006; Sonntag et al. 2007]. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verwendung von rotierenden NiTi-Systemen zu einer gleichmäßig konischen Kanalform mit nur geringer Verlagerung des Kanals führen kann [Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005; Schäfer et al. 2006; Sonntag et al. 2007]. Weiterhin wurde berichtet, dass im Vergleich zur manuellen Aufbereitung mit

Edelstahlinstrumenten die Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten die Prävalenz sowie das Ausmaß der Wurzelkanalbegradigung reduzieren kann [Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003; Schäfer et al. 2004]. Dennoch konnten aufbereitungsbedingte Fehler nicht vollständig eliminiert werden und signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen NiTi-Systemen bestanden weiter [Yoshimine et al. 2005; Schäfer et al. 2006]. Hinsichtlich der Reinigungswirkung wurde eine gut gesäuberte und glatte Kanaloberfläche im koronalen sowie mittleren Wurzelkanaldrittel mit NiTi-Instrumenten erzielt, jedoch verblieben im apikalen Bereich Reste von Pulpengewebe sowie größere Ansammlungen von Debris [Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004]. Die manuelle Aufbereitung mit konventionellen Edelstahlinstrumenten erzeugte eine gleichwertige oder sogar bessere Reinigungswirkung [Prati et al. 2004]. Die Literatur zeigt bei der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit NiTi-Instrumenten in vielen Fällen widersprüchliche Resultate hinsichtlich der Parameter der Reinigungswirkung, die aufgrund unterschiedlicher, nicht standardisierter Untersuchungsmethoden kaum miteinander vergleichbar sind.

Mit dem Ziel, die noch bestehenden Defizite in der Wurzelkanalaufbereitung zu reduzieren, wenn nicht gar zu eliminieren, werden stetig neue rotierende NiTi-Systeme auf dem Dentalmarkt vorgestellt. Bereits bestehende Systeme unterliegen einer permanenten Weiterentwicklung und durch Veränderung der Konstruktionsmerkmale wird versucht, deren Praktikabilität zu verbessern. In der vorliegenden Arbeit wurden daher ein erst kürzlich auf dem Dentalmarkt vorgestelltes sowie ein weiterentwickeltes rotierendes NiTi-System untersucht und mit der manuellen Aufbereitung mit Edelstahlinstrumenten verglichen.

2. Literaturübersicht

2.1 Ziele der Wurzelkanalbehandlung

Das Endodont stellt ein sehr komplexes, dreidimensionales Kanalgeflecht mit zahlreichen Seitenkanälen, Nischen und Buchten, blind endenden Divertikeln sowie Anastomosen der einzelnen Kanäle untereinander dar [Meyer 1970]. Schon aus anatomischer Sicht scheint es daher schwierig, dieses Kanalsystem ausreichend reinigen zu können. Die Aufbereitung des Wurzelkanalsystems setzt sich aus den interagierenden Einzelkomponenten Reinigung und Desinfektion sowie der Formgebung für die Aufnahme einer dichten und wandständigen Wurzelkanalfüllung zusammen. Im Rahmen einer Wurzelkanalaufbereitung ist nicht nur das pulpaie Weichgewebe zu entfernen, sondern auch das zirkumpulpaie Dentin der Kanalwand, welches bis zu 1,2 mm tief mit Mikroorganismen und Endotoxinen besiedelt sein kann [Hülsmann 2000]. Trotz dieser ungünstig erscheinenden Umstände konnte in verschiedenen Arbeiten gezeigt werden, dass unter möglichst sterilen Kautelen die chemo-mechanische Behandlung des Wurzelkanals eine Keimreduzierung erreichen kann, die langfristig klinische Erfolge in etwa 70-80 % der Fälle ermöglicht [Hülsmann 2000]. Neben der Reinigung ist auch die Formgebung des endodontischen Systems für den Therapieerfolg von großer Bedeutung. Durch die mechanische Erweiterung und den Materialabtrag wird nicht nur die Reinigungswirkung erhöht. Erst durch die Schaffung eines ausreichend großen Zuganges wird eine adäquate desinfizierende Wirkung der Spüllösungen sowie medikamentöser Einlagen im apikalen Wurzeldrittel ermöglicht. Während der mechanischen Aufbereitung ist darauf zu achten, dass der originäre Wurzelkanalverlauf beibehalten wird und der aufbereitete den ursprünglichen Kanal möglichst vollständig umschließt. Weiterhin wird eine von apikal nach koronal konisch gestaltete Form empfohlen, ohne dass dabei die Wurzel durch übermäßigen Materialabtrag geschwächt wird [ESE 2006]. Die engste Stelle sollte am apikalen Endpunkt des Wurzelkanals liegen; die apikale Konstriktion sollte erhalten bleiben. Eine bakterielle Kontamination oder instrumentelle Irritation der periapikalen Gewebestrukturen, also ein Durchstoßen und Erweitern der apikalen Konstriktion, ist unbedingt zu vermeiden [ESE 2006].

2.2 Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

2.2.1 Entwicklung

Vor über 100 Jahren wurde erstmals ein spezielles Winkelstück entwickelt, mit dessen Hilfe die Wurzelkanalaufbereitung durch Verwendung eines rotierenden, maschinell gesteuerten Instrumentariums vereinfacht und verkürzt werden sollte. Als Erfinder des ersten Endodontie-Winkelstückes gilt *William H. Rollins*. 1889 spannte er feine Klaviersaiten in ein Winkelstück und ließ diese um 360° rotieren und reduzierte die Umdrehungszahl auf 100 Umin^{-1} , um eine Fraktur der feinen Instrumente zu vermeiden [Hülsmann et al. 2005].

Erst 30 Jahre später kamen Winkelstücke auf den Markt, bei denen diese Vollrotation durch eine partielle Rotation und/oder starre Hubbewegungen ersetzt wurde. Die eigentliche Epoche der maschinellen Wurzelkanalinstrumentation begann Ende der 50er Jahre mit der Einführung des Racer-Feilenkopfes (Hubbewegung) und des Giromatic-Winkelstückes (reziproke Rotation 90°). Alle zu dieser Zeit verfügbaren maschinellen Aufbereitungssysteme arbeiteten mit einem vollständig starren Bewegungsablauf (Hub- und/oder Drehbewegung), lediglich die Umdrehungsgeschwindigkeit konnte durch den Behandler gesteuert werden [Hülsmann 1996].

In den 80er Jahren wurde vom Prinzip des starren Bewegungsablaufs abgewichen und mit der Entwicklung des Canal-Finder-Systems durch *Levy* stand 1984 ein maschinelles Aufbereitungssystem mit einem modifizierten, nicht vollständig starren Bewegungsablauf zur Verfügung. Die primäre Bewegungsrichtung war eine Hubbewegung mit variabler Amplitude von 0,3 bis 1 mm, welche sowohl von der Drehzahl des Mikromotors als auch von der Friktion des Instruments im Wurzelkanal abhängig war. Je höher die Umdrehungszahl gewählt wurde, desto geringer war die Bewegungsamplitude und verringerte sich mit zunehmender Friktion des Instrumentes im Wurzelkanal. Wurde der auf das Instrument einwirkende Kanalwiderstand zu groß, gab eine Rutschkupplung im Kopf des Winkelstückes die Instrumentenachse frei. Der Bewegungsablauf des Canal-Finder-Systems wird als „autodynamisch“ bezeichnet, da die Rotationskomponente erst durch den Kontakt der Schneiden der jeweiligen Instrumente mit der Kanalwand induziert wird [Hülsmann 1996]. Weitere Vertreter dieser Gruppe sind der Endoplaner (Microna; Spreitenbach, Schweiz) mit kleinen rein koronalwärts gerichteten Schabbewegungen, das Excalibur-Winkelstück (W&H; Bürmoos, Österreich) mit niedrigfrequenten lateralen („aleatorischen“) Schwingungen oder das Endoflash-System mit einer drehmomentbegrenzten Rotation.

2.2.2 Eigenschaften der Nickel-Titan-Instrumente

Nickel-Titan-Legierungen (NiTi Legierungen) sind einige der bekanntesten Vertreter der sogenannten Formgedächtnis-Legierungen (engl.: shape memory alloy, SMA) und allgemein unter dem Begriff *Nitinol* bekannt, ein Akronym für "**N**ickel **T**itanium **N**aval **O**rdnance **L**aboratory".

Zwei unterschiedliche Typen der Nitinol-Legierung wurden hervorgebracht; hierzu zählen die so genannte 55-Nitinol- (55 m% Nickel und 45 m% Titan) sowie die 60-Nitinol-Legierung (60 m% Nickel und 40 m% Titan). Erstere findet unter anderem Anwendung in elektronischen Geräten sowie in der Flugzeugtechnik, 60-Nitinol hingegen wird aufgrund seiner antimagnetischen Eigenschaften und seiner hohen Korrosionsbeständigkeit gegenüber Salzwasser vornehmlich in der Meeresforschung eingesetzt. Die in der Endodontie verwendeten NiTi-Instrumente sind aus der 55-Nitinol-Legierung hergestellt und enthalten stets Spuren von Eisen und Kobalt.

Als ein Vertreter der so genannten Formgedächtnis-Legierungen zeichnet sich die NiTi-Legierung durch zwei wesentliche Eigenschaften aus. Sie besitzt einerseits ein pseudoelastisches Verhalten und darüber hinaus auch einen Formgedächtnis-Effekt (Memory-Effekt).

Unter dem *pseudoelastischen Verhalten* auch „Superelastizität“ genannt versteht man die sehr ausgeprägte elastische Dehnbarkeit von Memory-Legierungen, welche die Elastizität konventioneller Metalle um etwa das 20-fache übertrifft. Nach dem Erreichen einer vergleichsweise geringen Elastizitätsgrenze ist bei weiterem Belastungsanstieg eine rückstellbare Verformung von bis zu 8 %_{lin} (lineare Verformung) möglich. Dieser Effekt beruht auf einer Kristallgitterumwandlung im Metall; nach Belastungsabfall erfolgt die Rückstellung [Thompson 2000; Bergmans et al. 2001]. Lässt man auf ein Instrument eine Kraft wirken, zum Beispiel durch Biegung, erfolgt zunächst eine elastische Deformation. Mit weiter ansteigendem Biegemoment und Überschreiten der vergleichsweise geringen Elastizitätsgrenze kommt es zu einer Kristallgitterumwandlung in der Legierung. Dabei wird die sogenannte Austenit-Phase, ein kubisch-flächenzentriertes Gitter, in die Martensit-Phase, ein kubisch-raumzentriertes Gitter umgewandelt. Werden die Instrumente anschließend entlastet, erfolgt eine elastische Rückstellung mit einer Umstellung des Gitters in seine natürliche Form (vgl. Abb. 2.1). Das Instrument federt in seine Ursprungsform zurück, ohne sichtbare Verformungen aufzuweisen.

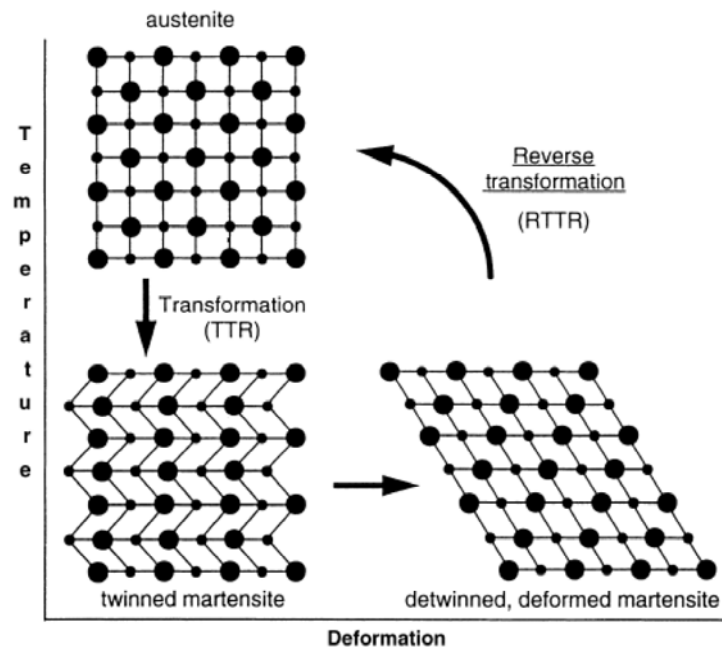


Abb. 2.1 Transformation. Das Diagramm zeigt die temperaturinduzierte, reversible Kristallgitterumwandlung von der Austenit-Phase zur Martensit-Phase.***

Demgegenüber ist bei Edelmetallinstrumenten unter analogen Versuchsbedingungen nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze keine elastische Rückstellung möglich; vielmehr ist das Instrument danach plastisch verformt. Belastet man nun das NiTi-Instrument über den Bereich der elastischen Deformation weiter, so folgt bei Überschreiten einer weiteren kritischen Spannung schließlich eine plastische Deformation. Das NiTi-Instrument ist jetzt verbogen. Der entscheidende Unterschied zu den Edelmetallinstrumenten liegt darin, dass bei den NiTi-Feilen der Bereich der plastischen Deformation sehr eng begrenzt ist und die Bruchgrenze bei nur geringem Belastungsanstieg unvermeidbar ist.

Es kommt somit relativ schnell und meistens ohne für den Behandler an einer Deformation der Schneiden erkennbare Vorwarnung zur Fraktur. Setzt man das Instrument wiederholt Be- und Entlastungszyklen aus, nimmt der Bereich der rückstellbaren Verformung des Nitinols kontinuierlich ab.

*** Entnommen aus: Thompson SA: An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. Int Endod J, 2000; 33: 297-310

Wenn ein NiTi-Instrument plastisch verformt wird, tritt die zweite besondere Eigenschaft von NiTi-Legierungen in den Vordergrund: der *Memory-Effekt*. Dies ist die Fähigkeit eines Metalls, eine bei einer niedrigen Temperatur erfahrene, auf Kristallgitterumwandlung beruhende, plastische Verformung nach dem Erwärmen spontan durch Rückumwandlung der Kristallstruktur zurückzustellen. Wird ein plastisch verformtes Instrument über die Umwandlungstemperatur auf ca. 125°C erwärmt (z. B. Sterilisierung), so erfolgt eine Rückstellung der Verformung, indem das Kristallgitter in die Hochtemperaturmodifikation zurückgebildet wird. Das Instrument erhält seine ursprüngliche Form wieder zurück.

Zu den weiteren Materialeigenschaften, die die Arbeitsleistung eines Instrumentes beeinflussen, zählt die Härte. Sie bestimmt die Schneidfähigkeit maßgeblich und muss über der des Wurzelkanalwanddentins liegen [Thompson 2000]. Die in der Literatur angegebene *Vickers*-Härte des Wurzelkanalidentins liegt in einem Bereich zwischen 28 - 35 HV. Deutlich höhere Werte weist Nitinol mit einer durchschnittlichen Oberflächenhärte von 303 - 362 HV auf. Edelstahlinstrumente hingegen sind mit 522 - 542 HV fast doppelt so hart im Vergleich zu NiTi-Instrumenten [Schäfer 2002]. Da die Härte eines Schneidwerkzeugs an seiner Schneide unmittelbar für die Effizienz verantwortlich ist, muss diese für die NiTi-Instrumente als nachteilig bewertet werden.

Neben der Härte hat die Oberflächenbeschaffenheit der Schneidekanten einen entscheidenden Einfluss. Bedingt durch den Herstellungsprozess bei NiTi-Instrumenten durch Fräsung eines Rohlings sind Oberflächendefekte entlang der Schneiden unvermeidbar und zusätzlich für eine geringere Schneidleistung verantwortlich [Alapati et al. 2005; Parashos und Messer 2006]. Durch Optimierung der Herstellungsprozesse ist es im Laufe der Zeit gelungen, die Schneidekanten der rotierenden NiTi-Instrumente zu verbessern. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung liegt in der Nachbehandlung der Instrumentenoberflächen. Eine Möglichkeit ist die Ionenimplantation von Stickstoff oder Bor [Lee et al. 1996; Schäfer 2002]. Bei diesem Verfahren wird im Vakuum an der Instrumentenoberfläche eine etwa 2 µm dicke Ionen-plattierte Titannitridschicht sowie eine ca. 0,2 µm starke Titanboridschicht gebildet. Diese Schichten zeichnen sich durch eine sehr hohe Härte und Korrosionsbeständigkeit aus und gelten als besonders verschleißfest. Es konnte nachgewiesen werden, dass Nitrierprozesse beziehungsweise Stickstoffionen-Implantationen in der Instrumentenoberfläche eine Verbesserung der Schneidleistung sowie eine Abnahme des aufbereitungsbedingten Schneidekantenverschleißes bewirken [Lee et al. 1996; Rapisarda et al. 2000; Rapisarda et al. 2001]. Eine ähnliche Technologie findet sich in der so genannten PVD-Beschichtung (**P**hysical **V**apour **D**eposition), eine Gruppe von vakuumbasierten Beschichtungsverfahren beziehungsweise Dünnschichttechnologien, bei der die Schicht

direkt durch Kondensation eines Materialdampfes des Ausgangsmaterials gebildet wird. Mittels einer magnetisch gefilterten Lichtbogen-Plasmaquelle wird unter Vakuum eine 0,1 μm dicke Haftvermittlerschicht aus Titan aufgebaut. Auf diese wird nachfolgend die ca. 1 μm starke Titannitridschicht aufgetragen, welche aufgrund der hohen Härte von etwa 2200 HV deutlich zum Abriebschutz der Schneidekanten bei gleichzeitiger Verbesserung der Schneidleistung beiträgt [Schäfer 2002]. Erste Ergebnisse hinsichtlich der Oberflächenverbesserung von NiTi-Instrumenten sind sehr viel versprechend und es scheint denkbar, dass beschichtete Instrumente wesentlich häufiger angewendet werden [Lee et al. 1996; Rapisarda et al. 2000; Rapisarda et al. 2001; Schäfer 2002].

2.2.3 Konstruktionsmerkmale

Die Unterschiede zwischen den konventionellen Edelmetallinstrumenten und den neueren NiTi-Instrumenten bestehen hauptsächlich in der Gestaltung der Schneidengeometrien, den Schneidekanten, dem Spanraum und der Spitze des Instruments.

Konstruktionsmerkmale von Edelmetallinstrumenten

Die Dimension endodontischer Instrumente richtet sich nach den Vorgaben der International Standard Organisation (ISO). In der ISO-Norm 3630 sind die Maße und Toleranzen der Wurzelkanalinstrumente exakt festgelegt.

Der schneidfähige Bereich (Arbeitsbereich) ist nach ISO-Standard bei allen Instrumenten 16 mm lang und besitzt eine Konizität von 2 % (vgl. Abb. 2.2). Der Schaft ist variabel zwischen 5 und 15 mm lang, woraus sich Instrumentenlängen von 21, 25, 28 und 31 mm ergeben. Ein Farbsystem der Griffe mit zusätzlicher Größennummer erlaubt die schnelle visuelle Erkennung der Durchmesser.

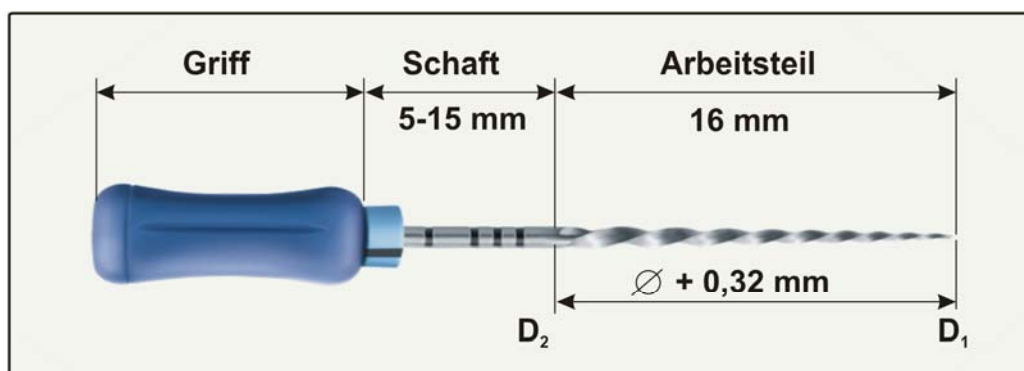


Abb. 2.2 Maße für Wurzelkanalinstrumente entsprechend der ISO-Norm.
 D_1 = der Durchmesser bei D_1 entspricht der ISO-Stärke des Instruments in 1/100 mm.
 D_2 = der Durchmesser am Ende des 16 mm langen Arbeitsteils entspricht $D_2 = D_1 + 0,32$ mm.

Konstruktionsmerkmale von NiTi-Instrumenten

Eines der wichtigsten Merkmale ist die abgerundete, nicht schneidende Instrumentenspitze (*Batt-Spitze*) (vgl. Abb. 2.3). Sie soll eine Selbstzentrierung der Instrumente im Wurzelkanal bewirken und das Ausmaß der Kanalbegradigung sowie das Risiko einer Perforation reduzieren.

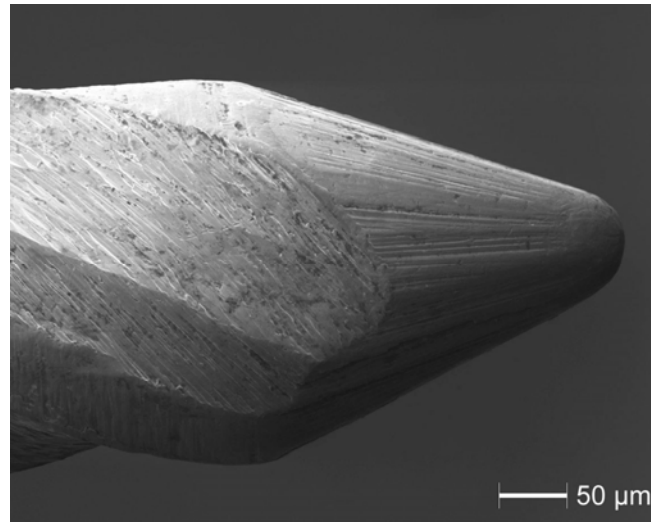


Abb. 2.3 Nicht schneidende Instrumentenspitze. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer K3 Feilenspitze (SybronEndo; West Collins, CA, USA).

Des Weiteren verfügen die meisten NiTi-Systeme über variierende Konizitäten (Taper). Während die ISO-Norm für Aufbereitungsinstrumente eine Konizität von 2 % über 16 mm Länge des schneidenden Arbeitsteiles vorschreibt, weisen viele NiTi-Systeme Taper von 4 bis 6 % auf (FlexMaster, VDW; Alpha System, Komet; Hero Shaper, Micro-Méga). Andere Systeme besitzen Konizitäten bis zu 12 % (K3, SybonEndo; GT-rotary system, Dentsply Maillefer; RaCe, FKG Dentaire) oder multiple Taper innerhalb eines Instrumentes (ProTaper Universal, Dentsply Maillefer). Die unterschiedlichen oder abgestuften Konizitäten sollen ermöglichen, dass nur ein kleiner Bereich der Kanalwand instrumentell bearbeitet wird. Daraus folgt ein geringerer auf das Instrument wirkender Reibungswiderstand mit reduzierter Torsionsbelastung. Sehr ausgeprägte Konizitäten sind jedoch nur bei reduzierter Länge des Arbeitsteiles zu realisieren, da sonst der sehr starke Feilendurchmesser die Wurzel koronal unnötig schwächen würde. Einige Systeme verfügen über Aufbereitungssequenzen, die separate Instrumente für die Ausformung des koronalen, mittleren und apikalen Wurzelkanalabschnittes vorsehen. Die Länge des schneidenden Arbeitsteils variiert bei diesen Instrumenten nach vorgesehenem Einsatz, dem Feilentyp und der Konizität

(z. B. Alpha-System) und soll neben der Zahnhartsubstanzschonung zu einer Reduktion der auf das Instrument einwirkenden Kräfte führen.

Die NiTi-Instrumente zeichnen sich weiterhin durch ihr vielfältiges Querschnittsdesign aus. Die Palette reicht von dreieckig-konvex, pentagonförmig, s-förmig aber u-förmig mit abgeflachten Schneidekanten („Radial lands“) bis hin zu asymmetrisch angeordneten Schneidekanten (vgl. Abb. 2.4).

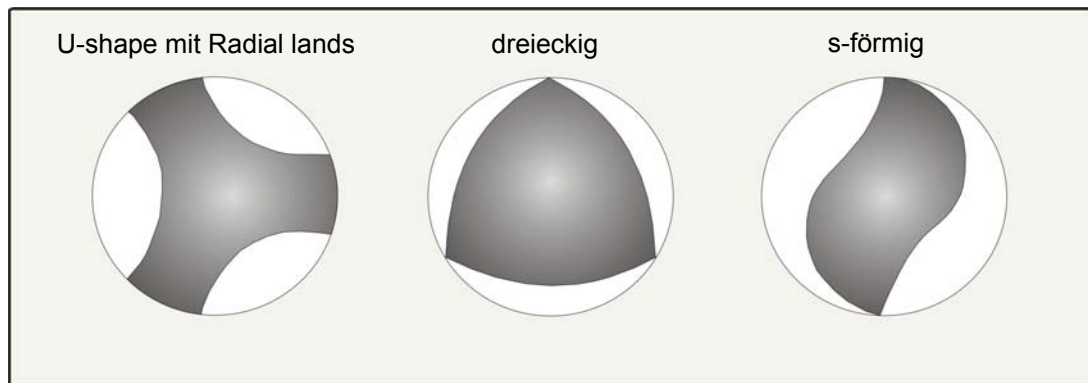


Abb. 2.4 Beispiele für Instrumentenquerschnitte. In der Grafik ist ein U-shape Design mit Radial lands, ein dreieckiger Querschnitt sowie ein s-förmiges Design zu erkennen.

Die Querschnittsgeometrie besteht prinzipiell aus Schneiden für den Materialabtrag sowie einem Spanraum (Nuten/Auskehlungen), der einen Materialabtransport ermöglicht. Auf dem Dentalmarkt existiert mittlerweile eine sehr breite Produktpalette rotierender NiTi-Instrumente mit sehr unterschiedlich gestalteten Schneiden und Auskehlungen, die zu Variationen im Anstellwinkel der Schneiden, der Schneidenanzahl sowie der Größe des Spanraumes führen.

Die abgeflachten Schneidekanten, so genannte „Radial lands“ (vgl. Abb. 2.4), sollen eine bessere Zentrierung des Instrumentes im Kanal bewirken und durch den eher schabend wirkenden Materialabtrag eine Verkeilung der Feile verhindern. Gleichzeitig muss beachtet werden, dass durch abgeflachte Schneiden die Kontaktfläche des Instrumentes mit der Wurzelkanalwand vergrößert wird, was zu einer stärkeren Reibung während der Aufbereitung und dem erhöhten Risiko einer Fraktur führen kann [Schäfer und Fritzenschaft 1999]. Darüber hinaus ist der Schneidekantenwinkel (Winkel, der zwischen der Instrumentenlängsachse sowie der Schneide gebildet wird) für die Effektivität eines Instrumentes mit verantwortlich (vgl. Abb. 2.5). Ein von der Instrumentenspitze zum Schaft hin ansteigender Schneidekantenwinkel führt zu weniger Windungen je Längeneinheit und einem größeren Abstand der Schneiden untereinander. Daraus resultierend ist ein größerer

Spanraum. Mit diesem Instrumentendesign versucht man den Abtransport des von der Spitze des Instrumentes bis zum Schaft hin sich ansammelnden Debris ungehindert zu ermöglichen und ein Verkleben durch Materialverblockungen zu verhindern. Nicht nur die Schneidenform ist entscheidend, ob ein Instrument aktiv oder passiv Material abträgt, sondern der auch daraus resultierende Spanwinkel (Winkel der Schneidekante in Bezug auf die Rotationsachse) während der Instrumentenrotation (positiv, neutral, negativ) (vgl. Abb. 2.6). Bei einem positiven Spanwinkel erfolgt ein eher aktiv-schneidender Materialabtrag, bei negativem eine mehr passiv-schabende Arbeitsweise.

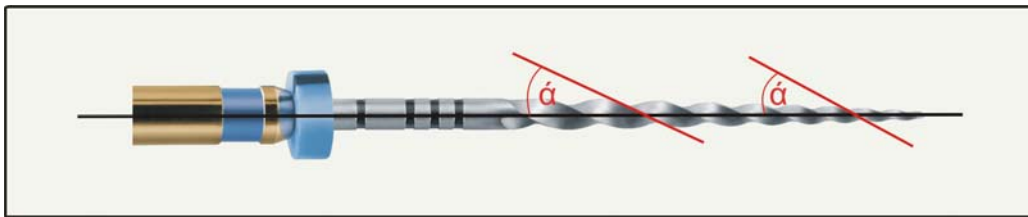


Abb. 2.5 Der Schneidekantenwinkel (α) wird durch die Instrumentenlängsachse (schwarze Linie) und die Schneidekanten (rote Linien) gebildet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kombination aus der Schneidenform sowie dem Spanwinkel die Schneideffizienz maßgeblich mitbestimmt. Die Größe des Spanraumes und die Anordnung des Schneidekantenwinkels beeinflussen hingegen hauptsächlich den Abtransport des abgetragenen Wurzelkanaldentins.

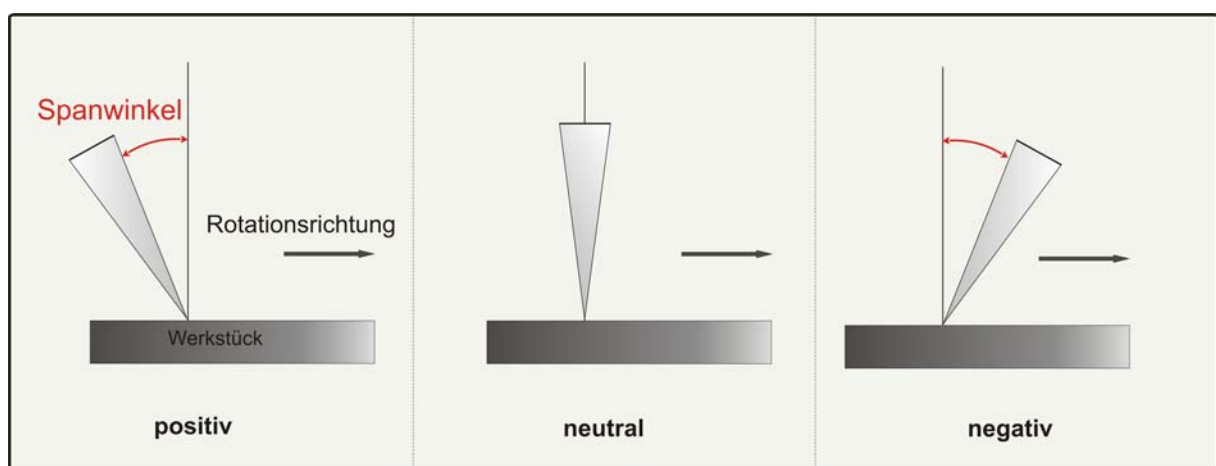


Abb. 2.6 Der Spanwinkel eines Instrumentes kann positiv, neutral oder negativ sein.

2.3 Parameter der Wurzelkanalbehandlung

Die mechanische Erweiterung des Wurzelkanals ist eine der wichtigsten Schritte während der Wurzelkanalbehandlung und beinhaltet nicht nur die Entfernung des infizierten Gewebes, die Erweiterung und Glättung des Kanallumens, sondern ermöglicht erst die chemische Desinfektion durch Spüllösungen und Medikamente. Die mechanische Aufbereitung und die chemische Desinfektion bedingen einander und werden unter dem Begriff der *chemo-mechanische Aufbereitung* des Wurzelkanals zusammengefasst.

Um die klinische Tauglichkeit eines Endodontieinstrumentariums zu beurteilen, sollten die verschiedenen Parameter Formgebung, Reinigungswirkung, Arbeitszeit und Arbeitssicherheit berücksichtigt werden.

Ein für den Großteil der praktizierenden Zahnärzte sehr bedeutsamer Gesichtspunkt ist die Zeit, die benötigt wird, um mit dem Instrumentarium einen Wurzelkanal aufzubereiten. Es bleibt jedoch zu erwähnen, dass die Trepanation, das Auffinden der Wurzelkanäle und die initiale Erschließung bis zum Foramen physiologicum häufig erheblich mehr Zeit in Anspruch nimmt als die eigentliche Aufbereitung der Kanäle.

Darüber hinaus sollten, wenn auch gegenüber anderen Punkten in untergeordneter Rolle, Aspekte der Handhabung und Anwenderfreundlichkeit mitbeachtet werden. Hierzu zählt natürlich die Frage, ob das System einfach in der Anwendung ist, aus wie vielen Instrumenten ein Set besteht und wie oft ein Instrument genutzt werden darf. Ob Probleme beim Wechseln der Instrumente auftreten und wie hoch die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten sind.

2.3.1 Formgebung

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Aufbereitungsqualität gekrümmter Kanäle ist die Kanalbegradigung. Diese zeigt, ob ein im Wurzelkanal arbeitendes Instrument in der Lage ist, die natürliche Krümmung des Kanales zu respektieren und diese zu erhalten, oder ob es zu einer Richtungs- und Formänderung kommt. Anhand der Begradigung kann man weiterhin erkennen, ob gleichmäßig Material sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite der Kanalkurvatur abgetragen wurde und das Risiko einer Perforation im apikalen Wurzelabschnitt minimiert ist (vgl. Abb. 2.7).

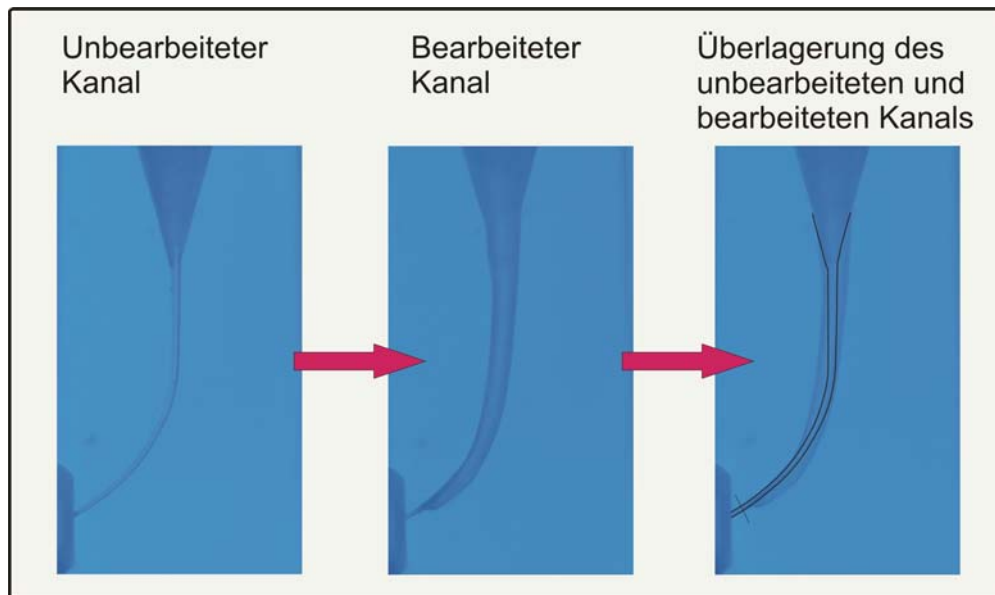


Abb. 2.7 Beispiel für die Lagebeziehung eines bearbeiteten Kanals zu seiner ursprünglichen unbearbeiteten Form. Der unbearbeitete simulierte Wurzelkanal in einem Kunststoffklötzchen (links) wird instrumentell bearbeitet (mittig), fotografiert und beide anschließend übereinandergelagert (rechts). Der ursprüngliche Kanal ist durchgezeichnet (schwarze Linie). Die Formveränderung durch die Aufbereitung wird deutlich.

Ergebnisse früherer Arbeiten zeigen, dass die natürliche Kanalkurvatur bei der Verwendung von NiTi-Instrumenten gut erhalten bleibt [Hülsmann et al. 2003; Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005]. Beim Vergleich unterschiedlicher NiTi-Systeme untereinander konnten jedoch auch signifikante Unterschiede in der Arbeitsweise herausgestellt werden. So wurde beispielsweise berichtet, dass die Verwendung des RaCe-Systems (FKG Dentaire; La-Chaux-de-Fonds, Schweiz) an simulierten Kanälen sowie an humanen extrahierten Molaren im Vergleich mit ProTaper (Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz) zu einer signifikant geringeren Wurzelkanalbegradigung führte [Schäfer und Vlassis 2004; Schäfer und Vlassis 2004]. Die Autoren vermuteten als eine der möglichen Ursachen die variierenden Konizitäten in Kombination mit den scharfen Schneiden sowie die höhere Flexibilität des RaCe-Systems. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen konnte in einer weiteren Untersuchung kein signifikanter Unterschied zwischen ProTaper und RaCe belegt werden, und beide Systeme zeichneten sich durch einen guten Erhalt der Kanalkrümmung aus [Paqué et al. 2005]. Weitere Studien dokumentieren auch stärkere Begradigungen bei der Anwendung von ProTaper verglichen mit dem GT rotary System (Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz), Hero 642 sowie ProFile (Dentsply Maillefer; Ballaigues, Schweiz) [Yun und Kim 2003; Guelzow et al. 2005].

Der Vergleich zwischen maschineller Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten und manueller Aufbereitung mit Edelstahlfeilen hinsichtlich der Begradigung von Wurzelkanälen zeigte in mehreren Studien eine Überlegenheit der rotierenden NiTi-Systeme [Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003; Schäfer et al. 2004]. Im Gegensatz dazu wies eine weitere Studie keine Unterschiede in der Ausprägung der Kanalverlagerung nach [Guelzow et al. 2005].

Insgesamt betrachtet zeigen die Studien unterschiedliche und teilweise auch gegensätzliche Resultate. Begründungen hierfür können in den unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen der einzelnen Systeme sowie in den Rahmenbedingungen (Operateur, Handhabung des Instrumentariums, Aufbereitungsgröße) liegen.

2.3.2 Reinigungswirkung

Die Analyse der Reinigungswirkung kann mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes anhand von Längs- oder Querschnitten extrahierter humaner Zähne erfolgen [Loushine et al. 1989; Hülsmann et al. 2003; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004]. Bei der Auswertung werden in der Regel vier Parameter erhoben: Reste von Pulpagewebe, Debris, Smear Layer sowie das Oberflächenprofil der Kanalwand [Bechelli et al. 1999; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004]. Neben der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung von Wurzelkanallängsschnitten werden auch Querschnitte der Kanäle für die Bewertung der Sauberkeit herangezogen, anhand derer lichtmikroskopisch nach der Aufbereitung der Anteil der instrumentell bearbeiteten Kanalzirkumferenz ermittelt wird [Versümer et al. 2002; Hülsmann et al. 2003; Hülsmann et al. 2003; Paqué et al. 2005]. Diese Querschnittsanalysen ermöglichen eine Untersuchung auf die vollständige zirkuläre Bearbeitung des Wurzelkanallumens und die Anhaftung grober Dentinreste, sind jedoch für die Ermittlung von Art und Umfang des Smear Layer nicht geeignet. Darüber hinaus ist dieses Verfahren sehr aufwändig, da für eine umfassende Bewertung des gesamten Wurzelkanallumens zahlreiche Schnitte pro Wurzel notwendig sind. Die meisten Autoren beschränken sich daher in den Studien auf wenige, meist 3 bis 5, Schnitte in festgelegten Abständen von der Wurzelspitze. Ein Vorteil dieser Querschnittstechnik zur Bewertung der Reinigungswirkung liegt in der Möglichkeit der zeitgleichen Bewertung der Formgebung (rund, oval, irregulär) [Loushine et al. 1989] sowie Vermessungen zwischen dem erweiterten Kanal und der Wurzelaußenfläche (Dentinreststickenbestimmung) für die Ermittlung kritischer Bereiche [Lim und Stock 1987]. Des Weiteren können Rückschlüsse hinsichtlich auftretender Begradigungen gezogen werden. Verschiedene Forschergruppen entwickelten hierzu einen geeigneten Index, die „centerio ratio“ oder Zentrierung, welche zeigt, ob zirkulär ein gleichmäßiger Materialabtrag durch die

Aufbereitung erfolgt ist [Calhoun und Montgomery 1988; Leseberg und Montgomery 1991; Gambill et al. 1996].

Debris

Das instrumentell abgetragene Dentin wird während der Wurzelkanalaufbereitung nicht vollständig aus dem Kanal abtransportiert, sondern findet sich stellenweis in lockeren, schollenförmigen Ablagerungen an der Wurzelkanalwand wieder. Diese als Debris bezeichnete Auflagerung kann zusätzlich Bakterien und Reste von Pulpagewebe enthalten.

Die zugängliche Literatur belegt, dass bei der Aufbereitung mit rotierenden NiTi-Instrumenten eine suffiziente Entfernung des Debris aus dem gesamten Wurzelkanal erzielt werden kann [Bechelli et al. 1999; Gambarini und Laszkiewicz 2002]. Einige Untersuchungen stellten keinen signifikanten Unterschied in den koronalen, mittleren und apikalen Wurzelkanalabschnitten hinsichtlich verbliebener Debris-Ansammlungen fest [Bechelli et al. 1999; Gambarini und Laszkiewicz 2002], andere Studien jedoch wiesen einen deutlichen Einfluss der Wurzelkanalregion auf die Reinigungswirkung nach [Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004; Schäfer und Vlassis 2004]. So wurde gezeigt, dass bei der Anwendung der rotierenden NiTi-Systeme K3, Hero642, RaCe, ProTaper, FlexMaster (VDW; München, Deutschland), ProFile und Mtwo (VDW; München, Deutschland) signifikant mehr Debris im apikalen Wurzelkanalabschnitt verblieb. Wohingegen im mittleren sowie koronalen Wurzelkanalanteilen eine effiziente Entfernung des Debris möglich war [Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004; Schäfer und Vlassis 2004].

Bei der Betrachtung der einzelnen NiTi-Systeme wird deutlich, dass Unterschiede in deren Reinigungswirkung bestehen. Untersuchungen der Arbeitsgruppe Schäfer fanden heraus, dass Mtwo verglichen mit K3 signifikant weniger Debris im Wurzelkanal hinterließ. K3 wiederum war dem RaCe-System überlegen [Schäfer et al. 2006]. In einer weiteren Studie dieser Arbeitsgruppe waren die Ergebnisse für das RaCe-System dem mit ProTaper überlegen [Schäfer und Vlassis 2004]. Andere Untersuchungen konnten hingegen keinen Unterschied zwischen den unterschiedlichen Systemen herausstellen [Hülsmann et al. 2003; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004; Paqué et al. 2005].

Vergleiche rotierender NiTi-Systeme mit der manuellen Aufbereitung mittels Edelstahlfeilen zeigen, dass beide Verfahren äquivalente Ergebnisse erzielen [Bechelli et al. 1999; Prati et al. 2004] oder die manuelle Aufbereitung in ihrer Reinigungswirkung überlegen war [Ahlquist et al. 2001; Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003].

Smear Layer

Sekundär kommt es während des Aufbereitungsvorganges zur Ausbildung einer Schmierschicht, des Smear Layer. Er besteht aus einem oberflächlichen Anteil, welcher die Kanalwand bedeckt, und einer darunterliegenden, locker mit dem Dentin verbundenen Schicht. Er wird während der Aufbereitung tief in die Dentintubuli hineingepresst und verringert hiermit die Permeabilität des Dentins.

Die zugängliche Literatur verdeutlicht, dass äquivalent zum Debris im Vergleich zum koronalen und mittleren Abschnitt vermehrt im apikalen Wurzelkanalabschnitt Smear Layer zu finden ist [Bechelli et al. 1999; Hülsmann et al. 2003; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004; Schäfer und Vlassis 2004]. Des Weiteren konnten keine besseren Ergebnisse bei der Anwendung von NiTi-Instrumenten verglichen mit den Edelstahlfeilen nachgewiesen werden [Bechelli et al. 1999; Ahlquist et al. 2001; Schäfer und Lohmann 2002; Prati et al. 2004]. Auch Unterschiede zwischen den einzelnen NiTi-Systemen hinsichtlich ihrer Neigung, einen Smear Layer zu produzieren, wurden nicht berichtet [Versümer et al. 2002; Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004; Schäfer und Vlassis 2004; Schäfer et al. 2006].

Unbearbeitete Wurzelkanalwandbereiche

Der Anteil an verbliebener, nicht bearbeiteter Wurzelkanalwand wird mit verschiedenen Methoden analysiert. Es liegen Studien vor, die mit Hilfe der hochauflösenden Computertomografie (μ CT) eine dreidimensionale Beurteilung des Wurzelkanales vor, während und nach der Aufbereitung durchführten [Peters et al. 2001; Hübscher et al. 2003; Peters et al. 2003; Paqué et al. 2005], wohingegen in weiteren Untersuchungen ein Rasterelektronenmikroskop für die Analyse verwendet wurde [Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004]. Eine weitere, einfach durchzuführende und häufig angewendete Methode stellt die Querschnittsanalyse des Wurzelkanals im koronalen, mittleren und apikalen Wurzeldrittel dar. Bei dieser Methodik steht jedoch die Beurteilung der Formgebung im Vordergrund und lässt nur Rückschlüsse hinsichtlich der mechanischen Reinigungswirkung zu.

Die Literatur zeigt, dass auch bei der Aufbereitung mit NiTi-Systemen größere Bereiche der Wurzelkanalwand unbearbeitet verbleiben [Peters et al. 2001; Hübscher et al. 2003; Peters et al. 2003; Paqué et al. 2005]. Diese unbearbeiteten Bereiche sind hauptsächlich an der konvexen Seite der Krümmung (in Richtung Furkation) im mittleren Wurzeldrittel und an der konkaven Krümmungsseite im apikalen Wurzeldrittel zu finden [Hübscher et al. 2003; Peters et al. 2003]. Eine Untersuchung von ProTaper belegte, dass 43 bis 49 % der Wurzelkanaloberfläche unbearbeitet bleiben [Peters et al. 2003]. Ähnliche Ergebnisse zeigte eine Untersuchung zu den NiTi-Systemen GT rotary,

LightSpeed und ProFile, in der 35 bis 40 % der Kanaloberfläche nicht instrumentell bearbeitet wurden [Peters et al. 2001]. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen konnten nicht herausgestellt werden. Die Evaluierung des rotierenden NiTi-Systems FlexMaster hinsichtlich seiner Formgebung zeigte keine anderen Ergebnisse. Auch hier waren Bereiche von 37 bis 47 % der Oberfläche unbearbeitet [Hübscher et al. 2003].

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass trotz genauer mechanischer Aufbereitung große Bereiche des Wurzelkanals unbearbeitet bleiben. Die Notwendigkeit der chemischen Desinfektion wird dadurch besonders unterstrichen.

2.3.3 Arbeitssicherheit

Instrumentenfrakturen gehören zu den unangenehmsten Zwischenfällen während einer endodontischen Behandlung. Unter erheblichen zeitlichen Mehraufwand und unter Einsatz von Spezialinstrumenten und -techniken lässt sich ein Teil der im Wurzelkanal verbliebenen Instrumentenfragmente wieder entfernen. In einzelnen Fällen können jedoch bei nicht zu entfernenden Instrumentenfragmenten apikalchirurgische Eingriffe notwendig werden; mitunter kann diese Komplikation zum Verlust des Zahnes führen.

Torsionsbrüche sowie Ermüdungsbrüche sind die zwei vorherrschenden Frakturarten, die bei der Anwendung von NiTi-Instrumenten auftreten [Sattapan et al. 2000]. Das Torsionsverhalten wird durch den Grad der Verdrehung bestimmt, bei dem ein an der Spitze eingeklemmtes und im Uhrzeigersinn gedrehtes Instrument abbricht sowie das bei dieser Torsion erreichte maximale Drehmoment. Demzufolge sollte in jedem Fall das mittlere maximale Drehmoment während der Anwendung unterschritten werden, um die bei der Präparation auftretenden Torsionskräfte deutlich unterhalb der Bruchgrenze von NiTi-Instrumenten zu halten. Aufgrund der Anwendung drehmomentkontrollierter Antriebssysteme sind Torsionsbrüche in der Praxis nicht die primär zu erwartenden Frakturen. Wesentlich häufiger dagegen sind die Ermüdungsbrüche, die auf einen biegebedingten Verschleiß des Instrumentes bei der Präparation zurückzuführen sind und meist ohne vorher erkennbare plastische Deformationen der Feile auftreten [Sattapan et al. 2000].

Faktoren, die das Frakturverhalten von rotierenden NiTi-Instrumenten beeinflussen, sind multifaktoriell und sehr komplex. Nicht nur die manuelle Geschicklichkeit und Erfahrung des ausführenden Zahnarztes spielen eine Rolle, auch die Wurzelkanalkonfiguration, das Instrumentendesign sowie die Herstellungsprozesse. Weiterhin beeinflussen die bei der Aufbereitung angewandten Kräfte, die Aufbereitungstechnik, die Anzahl der Feilenverwendungen und die

Sterilisationsprozesse die Frakturgefährdung [Mandel et al. 1999; Parashos et al. 2004; Hülsmann et al. 2005; Parashos und Messer 2006].

Der Grad der Wurzelkanalkrümmung ist von ausschlaggebender Bedeutung für das Frakturverhalten rotierend eingesetzter NiTi-Instrumente [Pruett et al. 1997; Haikel et al. 1999; Kuhn und Jordan 2002; Li et al. 2002]. Die Wahrscheinlichkeit eines Instrumentes, einen Ermüdungsbruch zu erleiden, nimmt mit steigender Wurzelkanalkrümmung zu [Pruett et al. 1997; Haikel et al. 1999; Li et al. 2002]. Weiterhin wurde beobachtet, dass der Bruch einer Feile mit großer Wahrscheinlichkeit im Zentrum der Kanalkrümmung, also an der Stelle der stärksten Biegebelastung, auftritt [Pruett et al. 1997].

Darüber hinaus beeinflussen die Konstruktionsmerkmale des Instrumentes die Widerstandsfähigkeit gegenüber zyklischer Ermüdung. Vergleiche zeigen, dass dickere NiTi-Instrumente schneller frakturieren als dünnere. Der Durchmesser und die Konizität eines rotierend eingesetzten Instrumentes verhalten sich demzufolge umgekehrt proportional zu deren Frakturanfälligkeit [Pruett et al. 1997; Haikel et al. 1999; Ullmann und Peters 2005; Yao et al. 2006]. Das bedeutet, dass bei Einsatz in gekrümmten Kanälen eine Zunahme des Instrumentendurchmessers (ISO-Größe) und der -konizität mit einer Verkürzung der Lebensspanne einhergeht. Für den Praktiker ist es daher wichtig, sich vor Augen zu führen, dass unter klinischen Bedingungen in gekrümmten Kanälen die dickeren Instrumente einem schnelleren Verschleiß unterliegen als dünnere.

Die Form des Instrumentenquerschnittes hat einen entscheidenden Einfluss auf das Biegeverhalten sowie die Verteilung der Belastung und auftretenden Kräfte auf das Instrument. In einer Untersuchung wurden zwei Querschnittsmodelle hinsichtlich ihrer Flexibilität, der auftretenden Kräfte bei Biege- und Torsionsbeanspruchung sowie der Verteilung der Kräfte evaluiert [Berutti et al. 2003]. Das konvexe Querschnittsdesign von ProTaper, wies verglichen mit dem konkaven ProFile-Querschnitt, eine um 30 % größere Querschnittsfläche auf. Gleichzeitig zeichnete sich der kleinere Querschnitt des ProFile-Systems durch eine höhere Flexibilität aus. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass bei ProTaper die während der Biegebeanspruchung sowie bei den Torsionsversuchen auf das Instrument auftretenden Kräfte geringer waren und eine gleichmäßigere Verteilung aufwiesen. Bei dem ProFile Modell waren die Kräfte nicht gleichmäßig verteilt und es entstanden hohe Spannungsspitzen in den Auskehlungen entlang der Schneide [Berutti et al. 2003]. Solche Akkumulationen von Spannungen beschleunigen den Verschleiß des Instrumentes und es kann in diesen Bereichen gehäuft zu einem Ermüdungsbruch kommen [Berutti et al. 2003]. Dies wurde in einer weiteren Studie bestätigt. Bei Vermeidung von extremen Spannungsspitzen kommt es

zu einem geringeren Verschleiß; somit wären Ermüdungs- sowie Torsionsfrakturen vermeidbar [Turpin et al. 2000].

Darüber hinaus spielen zusätzliche Faktoren wie die Anzahl der Schneidenwindungen per Längeneinheit, die Tiefe der Auskehlungen sowie die Aufbereitungssequenz der einzelnen Systeme eine weitere Rolle [Biz und Figueiredo 2004; Diemer und Calas 2004]. Es wurde gezeigt, dass Aufbereitungssequenzen mit verschiedenen Tapern bei den Feilen im Vergleich zu einer Sequenz mit einer Konizität sicherer gegenüber Ermüdungsfrakturen waren [Schrader und Peters 2005]. Grund hierfür ist, dass bei der Anwendung verschiedener Taper, die aufeinander in der Instrumentenreihenfolge abgestimmt sind, die Kontaktfläche des Instrumentes mit der Wurzelkanalwand reduziert und folglich auch die auf das Instrument wirkenden Kräfte minimiert sind [da Silva et al. 2005; Schrader und Peters 2005].

Auch die Art der Anwendung der Instrumente sowie die manuelle Geschicklichkeit und Erfahrung des Operators haben einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensspanne der Instrumente [Parashos et al. 2004]. Eine zyklische Auf- und Abbewegung der Instrumente während der Aufbereitung führt zu einer wesentlich verlängerten Lebensspanne der Instrumente bis zur zyklischen Ermüdung [Dederich und Zakariasen 1986]. Darüber hinaus kann das Vorsondieren des Wurzelkanales mit einem dünnen Handinstrument die Frakturrate von rotierenden NiTi-Instrumenten senken [Roland et al. 2002; Berutti et al. 2004; Patino et al. 2005].

Hervorzuheben bleibt, dass die Kanalgeometrie, der Operator sowie das Instrumentendesign die drei wichtigsten Punkte in der Frakturresistenz darstellen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Fraktur eines Instrumentes viele unterschiedliche Ursachen haben kann, die in Wechselwirkung miteinander stehen und sich gegenseitig beeinflussen.

3. Ziel der Arbeit und Arbeitshypothese

Mit dem Ziel, die Aufbereitung des Wurzelkanales unter Erhaltung seiner Geometrie zu vereinfachen und bestehende Probleme zu beseitigen, wurden Aufbereitungssysteme auf NiTi-Basis entwickelt. Viele Systeme sind bereits in Studien hinsichtlich ihrer Formgebung, Reinigungswirkung, Arbeitssicherheit sowie -zeit evaluiert worden, und die Ergebnisse verdeutlichen, dass aufbereitungsbedingte Fehler nicht vollständig eliminiert werden konnten, die Reinigungswirkung den Edelstahlfeilen nicht überlegen ist und signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen NiTi-Systemen bestehen. Mit dem Bestreben, die noch bestehenden Defizite in der Wurzelkanalaufbereitung zu reduzieren, werden stetig neue rotierende NiTi-Systeme auf dem Dentalmarkt vorgestellt und unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, das erst kürzlich auf dem Dentalmarkt vorgestellte rotierende NiTi-System Alpha-System (Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) sowie das weiterentwickelte System ProTaper Universal (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) hinsichtlich ihrer Formgebung, ihrer Arbeitszeit sowie Arbeitssicherheit zu untersuchen, und mit der manuellen Aufbereitungstechnik mit Edelstahlfeilen *in vitro* zu vergleichen. Die dabei zu analysierenden Parameter waren:

- der Anteil der nicht instrumentell bearbeiteten Kanalwand im apikalen, zentralen und koronalen Wurzelkanalanteil,
- die apikale Wurzelkanalbegradigung in vestibulo-oraler sowie mesio-distaler Ebene,
- die benötigte Instrumentierungszeit und
- auftretende Instrumentenfrakturen.

Die zu überprüfende Arbeitshypothese war, dass die Parameter Formgebung, Arbeitszeit und Arbeitssicherheit durch das verwendete System beeinflusst werden. Die zugrunde liegende Nullhypothese lautete, dass bei den Parametern Formgebung, Arbeitszeit und Arbeitssicherheit keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen bestehen.

Zusammenfassend sollte beurteilt werden, ob neuere rotierende NiTi-Aufbereitungssysteme der herkömmlichen manuellen Aufbereitung mit Stahlfeilen überlegen sind und ob sie für den täglichen klinischen Einsatz geeignet erscheinen.

4. Material und Methoden

4.1 Auswahl der Zähne

Für die Untersuchung wurden 45 extrahierte humane Unterkiefermolaren mit mesial gekrümmter Wurzel ausgewählt, die während der gesamten Versuchsdauer in einer 0,9 %-igen Kochsalzlösung (NaCl-Lösung 0,9 %; Fresenius Kabi, Bad Homburg, Deutschland) gelagert wurden.

Nach Trepanation der Zähne und Exstirpation des pulpalen Gewebes erfolgte die vorsichtige Sondierung der mesialen Wurzelkanäle mit einem Reamer der ISO-Größe 010 (VDW, München, Deutschland). Zähne, die ein oder mehrere der in Tabelle I genannten Ausschlusskriterien aufwiesen, wurden nicht verwendet.

Tabelle I Ausschlusskriterien für die Verwendung der Zähne

Ausschlusskriterien
nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum
offenes Foramen apikale
bereits durchgeführte Wurzelkanalbehandlung
große kariöse Defekte
Wurzelfrakturen
nicht getrennter Wurzelkanalverlauf in der mesialen Wurzel
nicht durchgängig sondierbare Kanäle
Durchmesser der apikalen Konstriktion größer als die Spitze eines Instruments der ISO-Größe 010

4.2 Muffelsystem

Für die Gewährleistung standardisierter Aufbereitungsbedingungen, einer reproduzierbaren Versuchsdurchführung und -auswertung wurde ein Muffelsystem aus Messing entwickelt. Dieses sollte nicht nur eine exakte Repositionierung der Probekörper in die Muffel ermöglichen, sondern auch die Anfertigung reproduzierbarer Röntgenbilder in zwei Ebenen (vgl. Abb. 4.1 bis Abb. 4.6).

Das System besteht aus einer Bodenplatte mit vier abnehmbaren Seitenteilen, einer Abdeckung sowie acht vertikalen Verschraubungen (vgl. Abb. 4.1). Im geschlossenen Zustand können Einbettungen und Aufbereitungen von Proben durchgeführt werden.

Der konisch gestaltete Innenraum sowie die asymmetrisch angeordneten, dreiecksförmigen Vorsprünge an den Seitenteilen dienten der genauen Positionierung der Proben sowie deren horizontaler Fixierung (vgl. Abb. 4.2). Die Abdeckung mit den Verschraubungen sicherte die Unverschieblichkeit in der Vertikalen.



Abb. 4.1 Muffelsystem aus Messing.

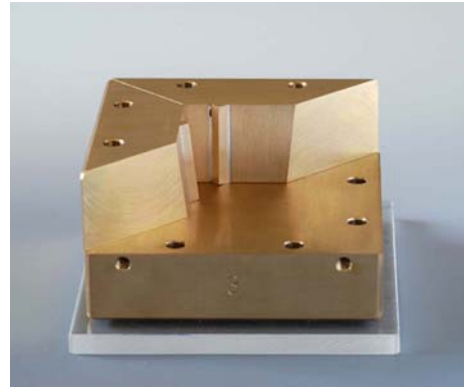


Abb. 4.2 Einblick in den Innenraum der Muffel. Die Seitenteile mit den dreiecksförmigen Vorsprüngen sichern die Position der Probekörper.

Für die Anfertigung von Röntgenbildern in mehreren Ebenen konnten je zwei der vier Messingseitenteile entfernt und ein zusätzlich röntgenstrahlendurchlässiges Seitenteil aus Plexiglas, mit einer nach Maß angefertigten Aussparung für den Röntgensensor eingesetzt werden (vgl. Abb. 4.3). Für die Positionierung eines Röntgentubus konnte ein Röntgenvisierring an vier Außenseiten der Bodenplatte befestigt werden (vgl. Abb. 4.4).



Abb. 4.3 Seitenteil aus Plexiglas für die Arretierung des Röntgensensors.

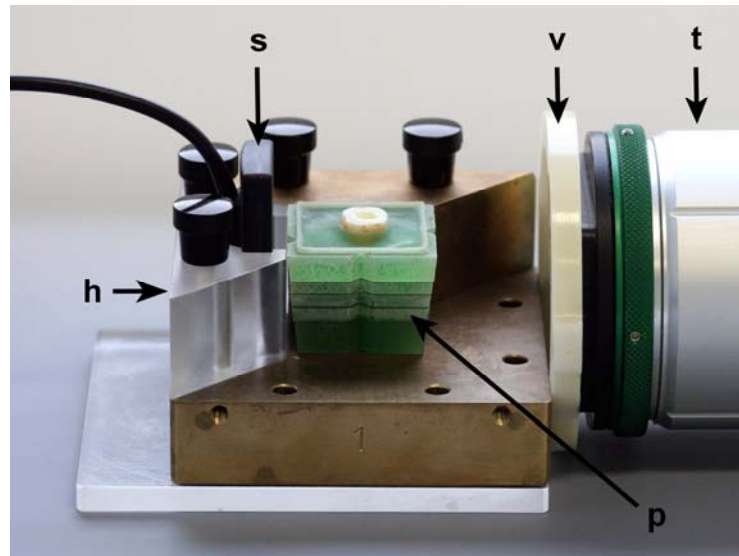


Abb. 4.4 Einblick in die halb geöffnete Muffel mit fixiertem Visierring (v) für den Röntgentubus (t) und inseriertem Probekörper (p). Der Halter (h) aus Plexiglas hat eine maß angefertigte Aussparung für den Röntgensensor (s).

4.3 Herstellung der Probekörper

Die bereits trepanierten und sondierten Zähne wurden zunächst mit einem kalt polymerisierenden Kunststoff (Technovit 4071; Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) in die Muffel eingebettet. Nach der Entnahme der Probekörper wurden diese an ihrer Unterseite auf Objektträger aus Plexiglas (dia-plus, Oststeinbeck, Deutschland) mit Sekundenkleber (Henkel, Düsseldorf, Deutschland) befestigt und anschließend in einer Poliermaschine mit einer Vakuumpumpe (Exakt Mikroschleifsystem; Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland) fixiert. Mit Hilfe der Poliermaschine und Schleifpapier (Körnung 320; Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland) erfolgte ein Parallelisieren und koronales Einkürzen der Zähne auf eine Länge von 19 mm. Daraufhin wurden die Probekörper mit einer Innenlochkreissäge (Sägemikrotom Leitz 1600; Leica Microsystem, Wetzlar, Deutschland) in 3, 6 und 9 mm Abstand zum Apex horizontal zersägt (vgl. Abb. 4.5). Das verwendete Sägemikrotom hat einen Schnittverlust von ca. 300 μm , der sich aus 260 μm Dicke des Sägeblatts und 40 μm Schwingungsverlust zusammensetzt. Die Schnitte des Probekörpers konnten anschließend einzeln in die Muffel repositioniert werden, wobei der schnittbedingte Materialverlust von 300 μm mit Metallplättchen derselben Stärke ausgeglichen wurde (vgl. Abb.4.6).

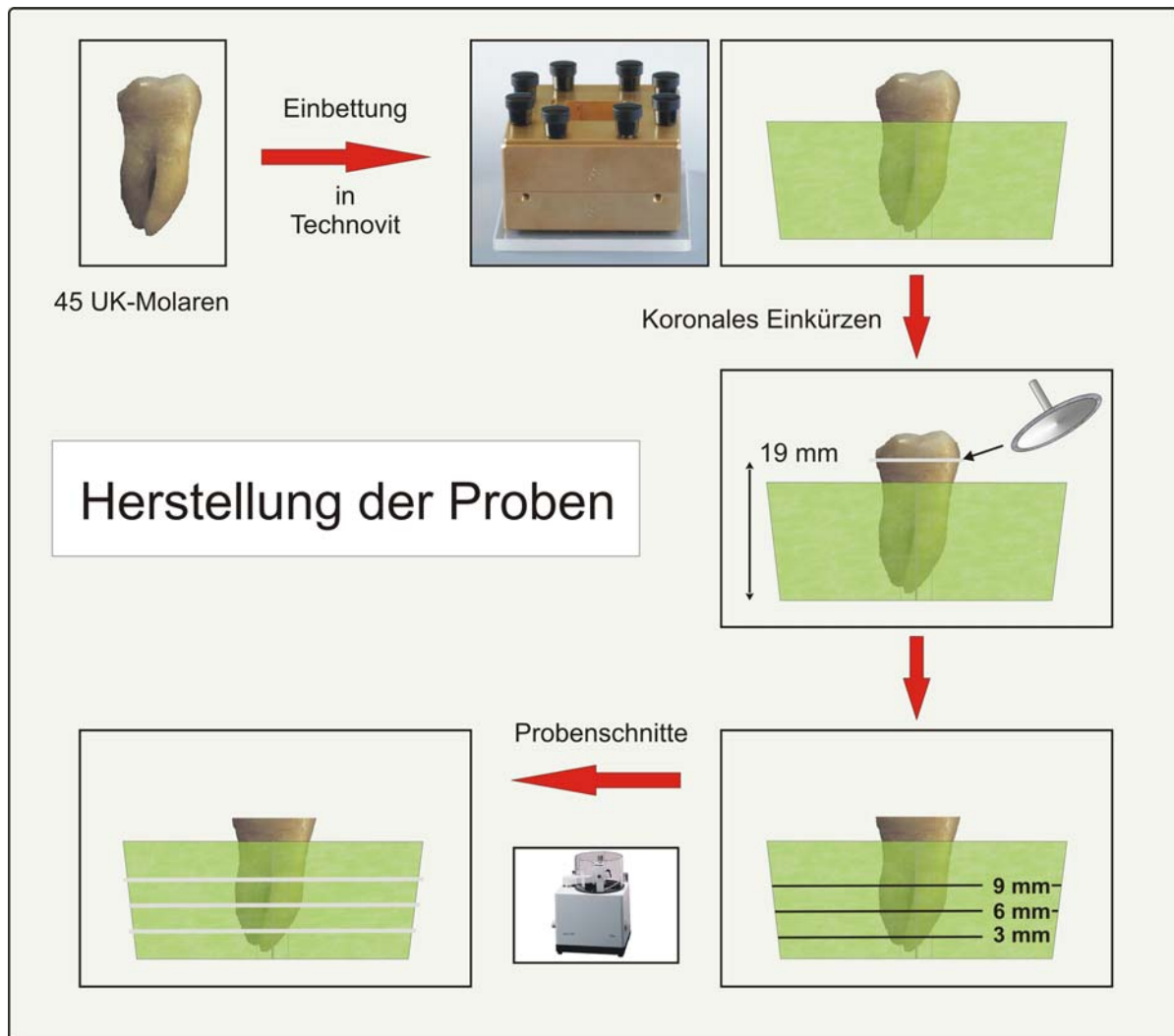


Abb. 4.5 Schematische Darstellung der Herstellung der Probekörper von der Einbettung bis zur Anfertigung der Schnitte.

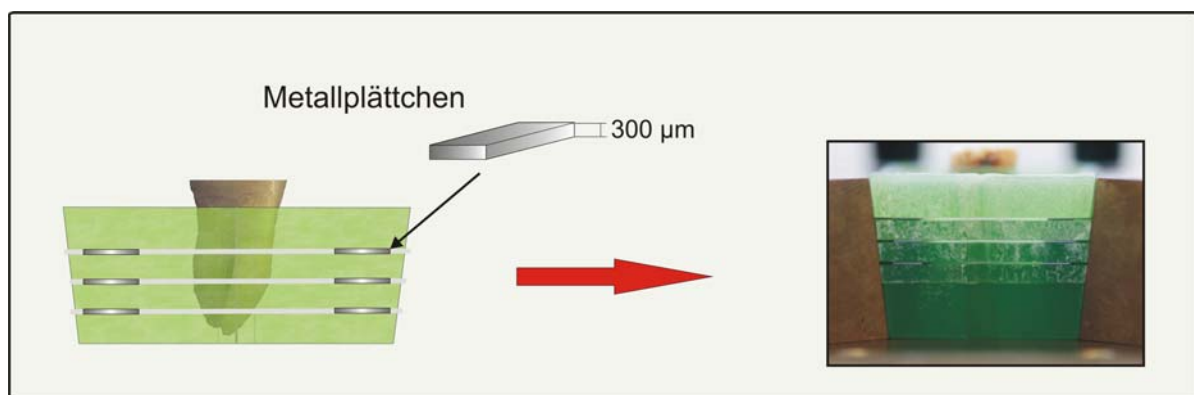


Abb. 4.6 Der schnittbedingte Materialverlust zwischen den einzelnen Probenschichten konnte mit Metallplättchen einer Stärke von 300 µm ausgeglichen werden.

4.4 Vorbereitung der Proben für die Wurzelkanalaufbereitung

Ausgangsrontgenbilder:

Für die Bestimmung der initialen Krümmungswinkel der Wurzelkanäle wurden digitale Röntgenaufnahmen (Planmeca intra; Planmeca; Hamburg, Deutschland) bei einer Röhrenspannung von 70 kV und einem Röhrenstrom von 8 mA angefertigt. Für die Aufnahmen wurden Reamer der ISO-Größe 010 (VDW) in den zu untersuchenden mesialen Kanal inseriert und die Röntgenbilder der Zähne in vestibulo-oraler Ebene sowie in mesio-distaler Ebene hergestellt.

Mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware AxioVision (AxioVision; Version 4.6.3, Carl Zeiss MicroImaging, Jena, Deutschland) konnte anhand der angefertigten Bilder die Bestimmung des initialen Krümmungswinkels [Hülsmann und Stryga 1993] erfolgen, der durch zwei Geraden gebildet wird, welche durch vier Punkte definiert sind (vgl. Abb. 4.7). Der erste Punkt (P1) liegt im Zentrum des Kanaleingangs und 2 mm unterhalb mittig im Kanalverlauf der zweite Punkt (P2). Im unteren Wurzeldrittel bildet die Kanalmitte in 1 mm Abstand zum röntgenologischen Apex den dritten Punkt (P3) und ein um 1,5 mm weiter koronal gelegener Punkt P4. Für die Analyse des Krümmungswinkels können nun zwei Geraden konstruiert werden, die sich in einem Winkel α schneiden, der die apikale Richtungsänderung innerhalb des Kanalverlaufs wiedergibt (vgl. Abb. 4.7).

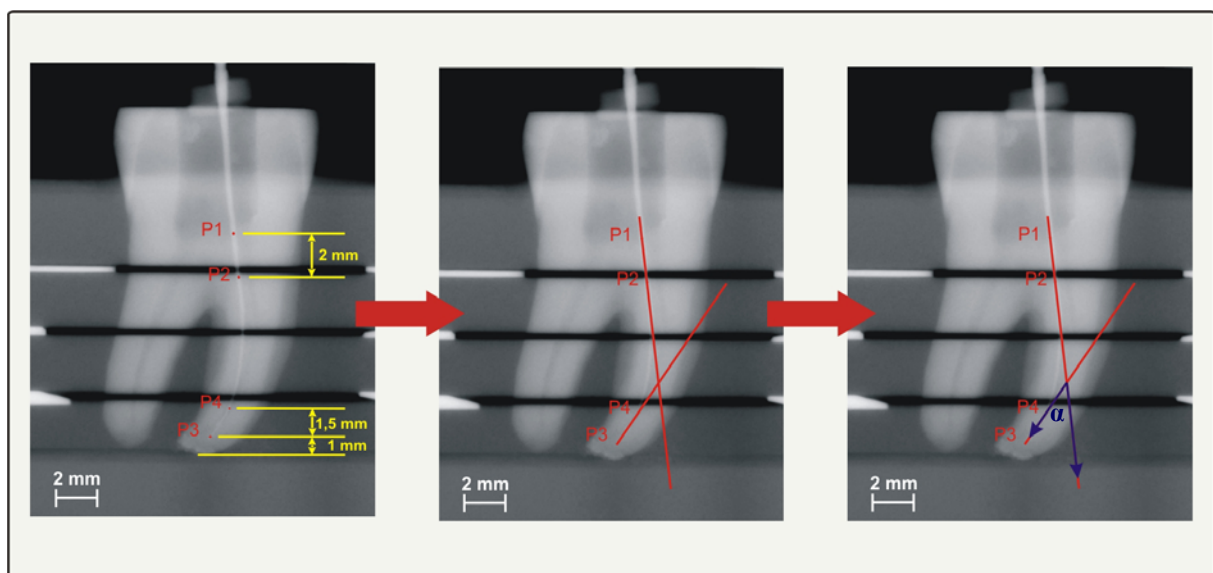


Abb. 4.7 Schematische Darstellung der Bestimmung des initialen Krümmungswinkels. Zunächst werden die Punkte P1 bis P4 im Kanalverlauf bestimmt (links). Anschließend können durch diese definierten Punkte zwei Geraden konstruiert werden (mittig), die sich in einem Winkel α schneiden (rechts).

Mit Hilfe der ermittelten Krümmungswinkel fand eine Klassifizierung und Vorsortierung der Zähne in drei Gruppen statt:

- a) geringe Krümmung: $< 25^\circ$
- b) mäßige Krümmung: 25° bis 35°
- c) starke Krümmung: $> 35^\circ$.

Aus diesen Gruppen wurden anschließend die Proben je nach Ausprägung der Kanalkrümmung den drei Testgruppen zugeteilt ($n=15$) und es konnte gewährleistet werden, dass alle Testgruppen eine annähernd gleiche Verteilung der Krümmungswinkel aufwiesen.

Zusätzlich fand eine Bestimmung der Arbeitslänge anhand der angefertigten Röntgenaufnahmen individuell für jede Probe statt.

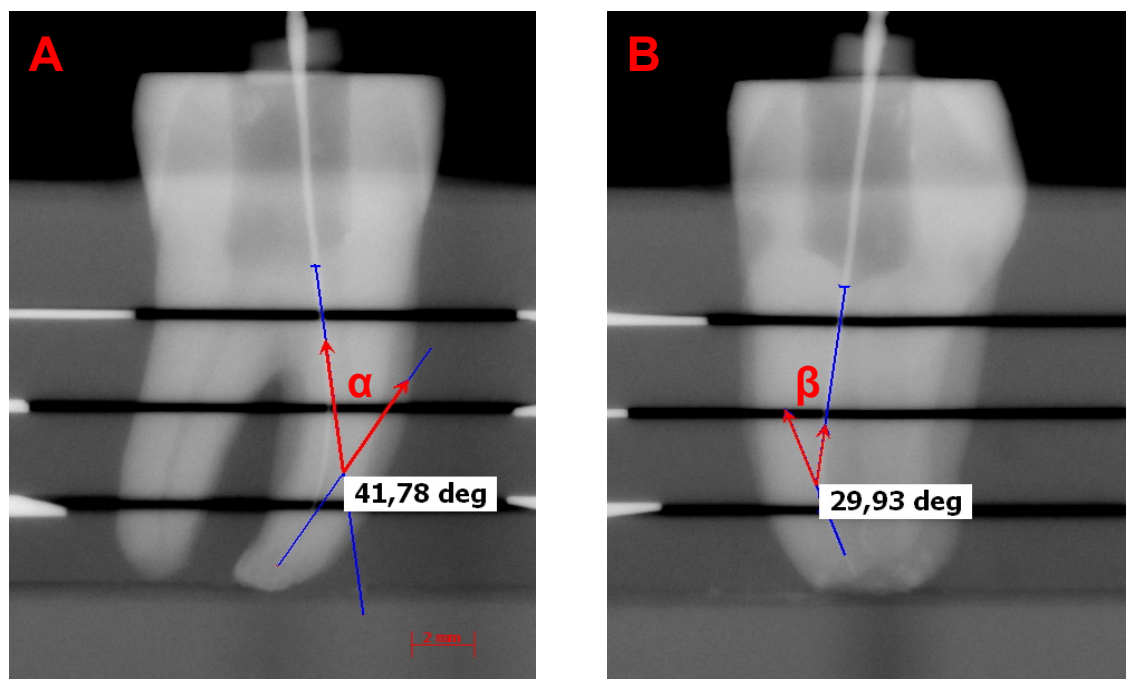


Abb. 4.8 Beispiel für die Winkelvermessung der unbearbeiteten Wurzelkanäle in zwei Ebenen. Anhand der festgelegten Punkte können zwei Geraden (blau) gebildet werden, die sich in einem Krümmungswinkel α (rot) schneiden. Links ist die Vermessung in der vestibulo-oralen Ebene (A) zu erkennen mit einem sich ergebenden apikalen Krümmungswinkel von $41,78^\circ$. Das rechte Bild zeigt die mesio-distale Ebene (B), hier wurde ein Winkel von $29,93^\circ$ bestimmt.

Wurzelkanalquerschnittsfotos:

Für die Querschnittsanalyse der Proben wurden nahe der Wurzelkanäle Referenzlinien mit Nagellack (Betrix, Frankfurt/Main, Deutschland) aufgebracht und anschließend mit einem Stereo Auflichtmikroskop (Carl Zeiss, Oberkochen, Deutschland) die koronalen, mittleren und apikalen Wurzelkanalquerschnitte fotografiert (vgl. Abb. 4.9). Von jedem Wurzelkanal wurden drei Aufnahmen (koronal, zentral, apikal) mit einem 2,5x Objektiv und Zoom von 2,0 koronal; 2,5 zentral sowie 3,2 apikal gewonnen. Diese hatten je nach Vergrößerung eine Kantenlänge von 2,55×1,91 mm (2,0 Zoom); 2,05×1,53 mm (2,5 Zoom); 1,57×1,17 mm (3,2 Zoom) bei einer Bildauflösung von 763×571 Pixel.

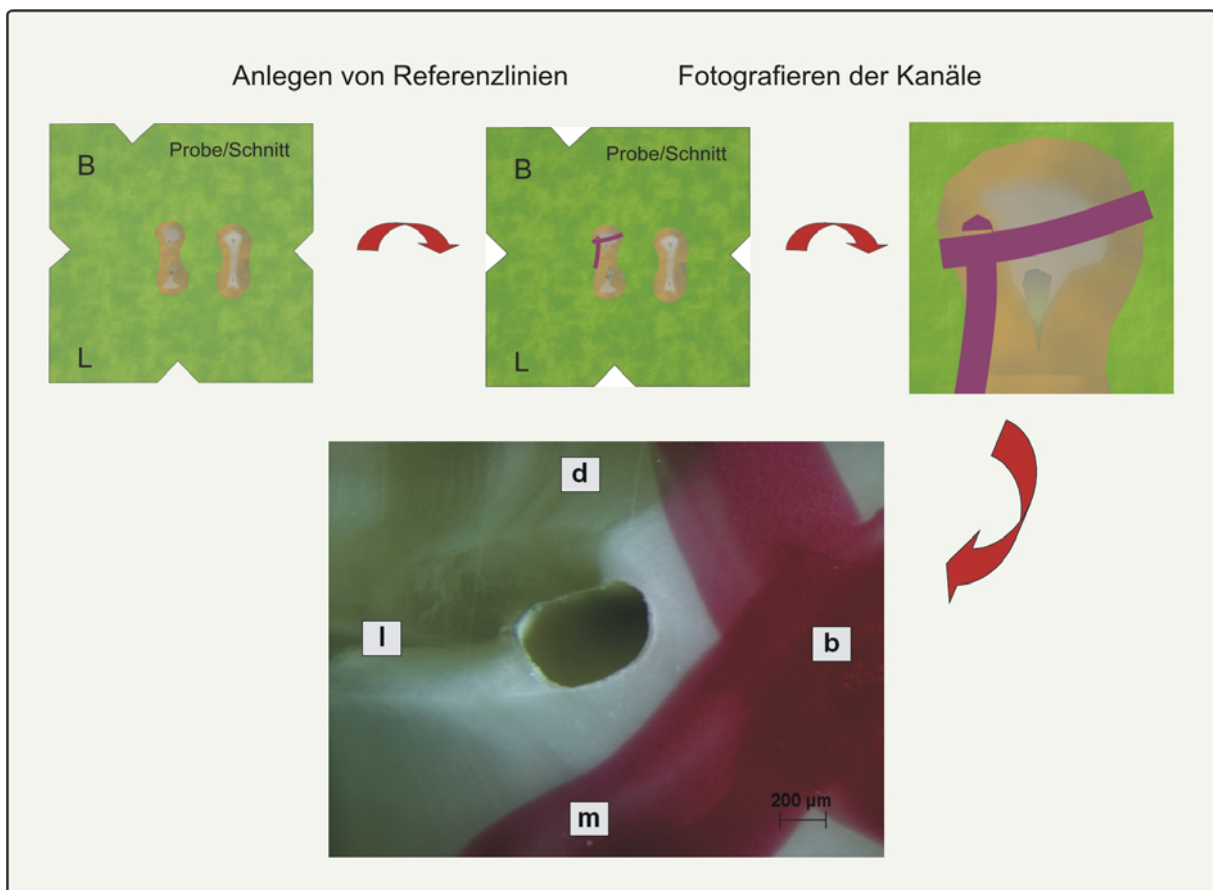


Abb. 4.9 Schematische Darstellung von Anlegen der Referenzlinien sowie Fotografieren des Wurzelkanalquerschnittes.

4.5 Aufbereitung der Wurzelkanäle

Nach Repositionierung der einzelnen Probekörperschnitte in die Muffel und Ausgleich des schnittbedingten Materialverlustes erfolgte die Aufbereitung der Wurzelkanäle je nach den Empfehlungen der Hersteller mit den systemspezifischen Feilensätzen. Alle Wurzelkanäle wurden apikal bis zu einer Masterfeile der ISO-Größe 030 erweitert; jede Feile wurde nur in einem Wurzelkanal verwendet und zuvor mit einer EDTA-Paste (Alpha Glide; Gebr. Brasseler; Lemgo, Deutschland; EDTA File care; VDW, München, Deutschland) beschickt. Mit dem Ziel apikal angesammelte Debris zu entfernen sowie nekrotisches Gewebe aufzulösen und den Schmiereffekt zu erhöhen, erfolgte nach jedem Instrumentenwechsel die Spülung des Wurzelkanals mit 2,5 ml einer 1 %igen Natriumhypochlorit-Lösung (Aug. Hedinger, Stuttgart, Deutschland).



Abb. 4.9 Feilen des Alpha-Systems



Abb. 4.10 ProTaper Universal



Abb. 4.11 Hedströmfeilen und Reamer für die manuelle Aufbereitung

Alpha-System

Das seit 2005 auf dem Dentalmarkt erhältliche Alpha-System gehört zu den rotierenden NiTi-Systemen und kann über einen drehmomentbegrenzten Endomotor oder ein Winkelstück angetrieben werden. Es steht in drei Grundaufbereitungssequenzen zur Verfügung, die je nach Wurzelkanalmorphologie und -weite ausgewählt werden können. Alle Feilen des Alpha-Systems weisen eine Titan-Nitrid-Beschichtung, abgerundete Spitzen und einen pentagonförmigen Instrumentenquerschnitt auf, mit Ausnahme des drachenförmigen Eingangserweiterers (AF10.045). Je nach morphologischer Ausgangssituation wird die geeignete Instrumentensequenz ausgewählt. Das Alpha-System besteht aus Instrumenten der Größe 020 gelb für enge Kanäle, Größe 025 rot für mittlere Kanäle sowie Größe 030 blau für weite Kanäle. Nach dem Sondieren des Kanals mittels Handinstrumenten bis zur ISO-Größe 015 erfolgt der

Einsatz der Instrumente nach der Crown-Down-Technik mit absteigendem Taper (10-06-04-02) bei gleichbleibender ISO-Größe. Eine Wurzelkanalaufbereitung beginnt stets mit dem Eingangserweiterer (AF10.045) unter Berücksichtigung der optimalen Drehzahl von 500 U/min. Alle weiteren Instrumente arbeiten bei einer Drehzahl von 250 U/min.

Tabelle II Verwendete Aufbereitungssequenz des Alpha Systems

Alpha System	
Hersteller:	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland
Arbeitsweise:	360° - Rotation
Antriebssystem:	Endo advance Winkelstück NT 120L (KaVo) Motor w&h MF perfecta SN 01862
Aufbereitungssequenz:	Mittlere Kanäle (rot 025) (5 Instrumente) Sondierung bis ISO 015 auf Arbeitslänge 1. ⇒ AF10.045 - 10 % Konizität, Größe 45 (Eingangserweiterer) 2. ⇒ AF06.025 - 6 % Konizität, Größe 25 (Crown down bis 2-3 mm vor Apex) 3. ⇒ AF04.025 - 4 % Konizität, Größe 25 (Crown down bis 2-3 mm vor Apex) 4. ⇒ AF02.025 - 2 % Konizität, Größe 25 (Arbeitslänge) 5. ⇒ AF02.030 - 2 % Konizität, Größe 30 (Arbeitslänge)

ProTaper Universal

Das rotierende NiTi-System ProTaper wurde im Jahr 2000 auf dem Dentalmarkt eingeführt und ist in einer weiterentwickelten und ergänzten Form als ProTaper Universal seit 2006 erhältlich. Unabhängig von der morphologischen Ausgangssituation der Wurzelkanäle steht eine aus sechs Feilen bestehende Grundsequenz zur Verfügung (vgl. Abb. 4.10). Diese ist aus drei Shaping-Feilen (SX, S1, S2), die insbesondere für die Ausformung des koronalen und mittleren Wurzelkanaldrittels konzipiert wurden, sowie aus drei Finishing-Feilen (F1, F2, F3) für die Erweiterung des apikalen Wurzelkanaldrittels zusammengesetzt. Alle Feilen besitzen eine abgerundete, nicht schneidende Führungsspitze; die Shaping-Feilen haben einen dreieckigen Instrumentenquerschnitt, welcher bei den Finishing-Feilen eine Auskehlung entlang der Schneide aufweist. Weitere Konstruktionsmerkmale sind die multiplen Konizitäten innerhalb eines Instruments und der von der Feilenspitze bis zum Schaft zunehmende Gewindesteigungswinkel (sich vergrößernder Spanraum).

Nach dem Sondieren des Kanals mit Handinstrumenten bis zur ISO-Größe 015 kann fakultativ eine Kanaleingangserweiterung mittels zweier Shaping-Feilen (SX und S1) durchgeführt werden. Anschließend erfolgt bei der Aufbereitung und Erweiterung der Kanäle der Einsatz der Instrumente auf voller Arbeitslänge und einer optimalen Drehzahl zwischen 250 bis 350 U/min.

Tabelle III Verwendete Aufbereitungssequenz mit ProTaper Universal

ProTaper Universal	
Hersteller:	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz
Arbeitsweise:	360° - Rotation
Antriebssystem:	Endo IT control Motor (VDW)
Aufbereitungssequenz:	<p><i>7 Instrumente</i></p> <p>Sondierung bis ISO 015 auf Arbeitslänge</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ⇒ S1 (shaping file 1) - 2-11 % Konizität, Größe 17 (Eingangserweiterer) 2. ⇒ SX (auxiliary shaper) - 3-19 % Konizität, Größe 19 (Eingangserweiterer) 3. ⇒ S1 (shaping file 1) - 2-11 % Konizität, Größe 17 (Arbeitslänge) 4. ⇒ S2 (shaping file 2) - 4-11,5 % Konizität, Größe 20 (Arbeitslänge) 5. ⇒ F1 (finishing file 1) - 7-5,5 % Konizität, Größe 20 (Arbeitslänge) 6. ⇒ F2 (finishing file 2) - 8-5,5 % Konizität, Größe 25 (Arbeitslänge) 7. ⇒ F3 (finishing file 3) - 9-5,5 % Konizität, Größe 30 (Arbeitslänge)

Manuelle Aufbereitung

Bei der Präparation erfolgte zunächst eine koronale Erweiterung der Kanaleingänge mit Gates-Glidden-Bohrern (VDW) der Größe 1-3 nach der Crown-Down-Technik. Anschließend wurde die Aufbereitung des Wurzelkanals in Anlehnung an die von Ingle [Ingle 1961] beschriebene „Standardisierte Technik“ durchgeführt. In alternierender Anwendung wurden konventionelle Reamer und Hedströmfeilen (VDW) auf vollständiger Arbeitslänge eingesetzt, die vorher entsprechend dem präoperativen Röntgenbild manuell vorgebogen wurden.

Tabelle IV Aufbereitungssequenz für die manuelle Aufbereitung mit Edelstahlfeilen

Manuelle Aufbereitung	
Hersteller:	(Vereinigte Dentalwerke, Deutschland)
Aufbereitungssequenz:	<i>7 Instrumente</i> Sondierung bis ISO 015 auf Arbeitslänge Koronale Erweiterung mit Gates-Glidden-Bohrern 1. ⇒ Reamer ISO Größe 015 (Arbeitslänge) 2. ⇒ Hedströmfeile ISO Größe 015 (Arbeitslänge) 3. ⇒ Reamer ISO Größe 020 (Arbeitslänge) 4. ⇒ Reamer ISO Größe 025 (Arbeitslänge) 5. ⇒ Hedströmfeile ISO Größe 025 (Arbeitslänge) 6. ⇒ Reamer ISO Größe 030 (Arbeitslänge) 7. ⇒ Hedströmfeile ISO Größe 030 (Arbeitslänge) 8. ⇒ Reamer ISO Größe 035 (Arbeitslänge) 9. ⇒ Hedströmfeile ISO Größe 035 (Arbeitslänge)

Die Aufbereitung aller Kanäle mit den drei verschiedenen Systemen sowie die Aufzeichnung und Auswertung der Studienparameter wurden von einem Behandler durchgeführt.

4.6 Bestimmung der Instrumentierungszeit und Frakturrate

Die benötigte Zeit zur Instrumentierung des Wurzelkanals wurde mit Hilfe einer digitalen Stoppuhr (www.jumk.de/stoppuhr, Internetservice Kummer + Oster, Buchenberg, Deutschland) bestimmt und der Zeitraum erhoben, in dem das eingespannte Instrument im Wurzelkanal arbeitete. Die zusätzlich benötigte Zeit für die Längenjustierung, für den Instrumentenwechsel und für die Wurzelkanalspülung wurden nicht berücksichtigt.

Nach dem einmaligen Gebrauch wurde jedes Instrument visuell auf etwaige Frakturen hin überprüft.

4.7 Anfertigung und Auswertung der Röntgenbilder

Für die Bestimmung apikaler Wurzelkanalbegradigungen wurden nach der Instrumentierung mit den Feilen der ISO-Größe 025 sowie nach Abschluss der

Aufbereitung (ISO-Größe 030) erneut digitale Röntgenbilder in vestibulo-oraler Ebene und mesio-distaler Ebene angefertigt. Hierfür wurden vorher die Kanäle mit Papierspitzen (Roeko, Coltène/Whaledent, Langenau, Deutschland) getrocknet und ein NiTi-Instrument der entsprechenden ISO-Größe (ISO 025, ISO 030) in den bearbeiteten Kanal inseriert.

Die Auswertung der Röntgenbilder erfolgte computergestützt mit Hilfe der Software Axio Vision mit der Zielsetzung, die Krümmungswinkel nach Instrumentierung bis ISO 025 und ISO 030 in beiden Ebenen zu ermitteln.

Für die Bestimmung der apikalen Verlagerung war eine aufbereitungsbedingte Verlagerung der koronalen Wurzelkanalachse zu vernachlässigen. Aufgrund der deckungsgleichen Röntgenbilder (identische Aufnahmeparameter, identische Zahnposition) konnte die ermittelte koronale Wurzelkanalzentralachse aus dem präoperativen Röntgenbild in die Aufnahmen nach ISO 025 und ISO 030 computergestützt hineinkopiert werden. Mit der Zielsetzung eine absolut identische Lage der koronalen Achse im Zahn sowie in den einzelnen Aufnahmen zu garantieren, erfolgte in dem Ausgangsröntgenbild zusätzlich zu den ursprünglichen Messungen (Winkelbestimmung) das Anlegen weiterer Referenzlinien, die zwischen charakteristischen Punkten verliefen (vgl. Abb. 4.12). Anschließend wurden diese zusammen mit der koronalen Wurzelkanalzentralachse in die Röntgenbilder nach Aufbereitung bis ISO 025 sowie ISO 030 kopiert und exakt wie im Ausgangsbild an den Punkten ausgerichtet (vgl. Abb. 4.12). Ziel dieser Methode war es, nur die apikale Richtungsänderungen des Kanalverlaufes nach der Aufbereitung zu ermitteln, unabhängig von der Verlagerung des Kanals im koronalen Anteil.

Im Anschluss erfolgte analog zu der bereits unter 4.4 beschriebenen Methode die Bestimmung des apikalen Kanalverlaufes. Die für die Winkelbestimmung benötigte erste Gerade war durch die koronale Zentralachse vorgegeben (vgl. Abb. 4.12 rechtes Bild) und die zweite Gerade, die den apikalen Verlauf des Wurzelkanales widerspiegelt, wurde bestimmt. Hierfür konnte in 1 mm Abstand zum röntgenologischen Apex ein Punkt in der Mitte des Kanals ermittelt und ein 1,5 mm weiter koronal gelegener Punkt zentral im Kanalverlauf gewählt werden. Der Winkel, in dem diese Gerade die koronale Zentralachse schneidet, gibt den Grad der Wurzelkanalkrümmung nach der Aufbereitung an. Vergleicht man den ursprünglichen Krümmungswinkel mit denen nach ISO 025 und ISO 030, können apikale Begradigungen des Kanals durch die entstehenden Winkeldifferenzen ermittelt werden (Abb. 4.13 und Abb. 4.14).

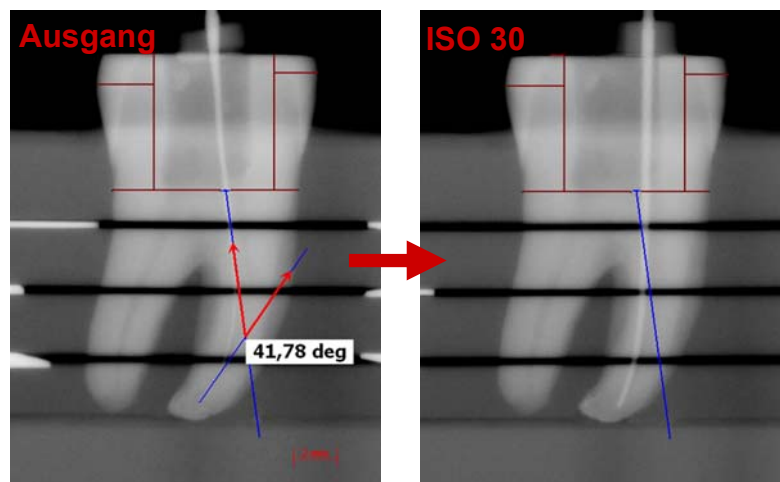


Abb. 4.12 Beispiel für die Festlegung und Übertragung der Referenzlinien. Links: In der präoperativen Röntgenaufnahme mit der Bestimmung des ursprünglichen Krümmungswinkels werden individuelle Referenzlinien gezogen (braun), die zwischen charakteristischen Punkten verlaufen. Anschließend werden diese mit der koronalen Wurzelkanalachse (blau) in die Aufnahme nach Aufbereitung bis ISO 030 kopiert und identisch zu der Ausgangssituation an den Punkten ausgerichtet (rechts).

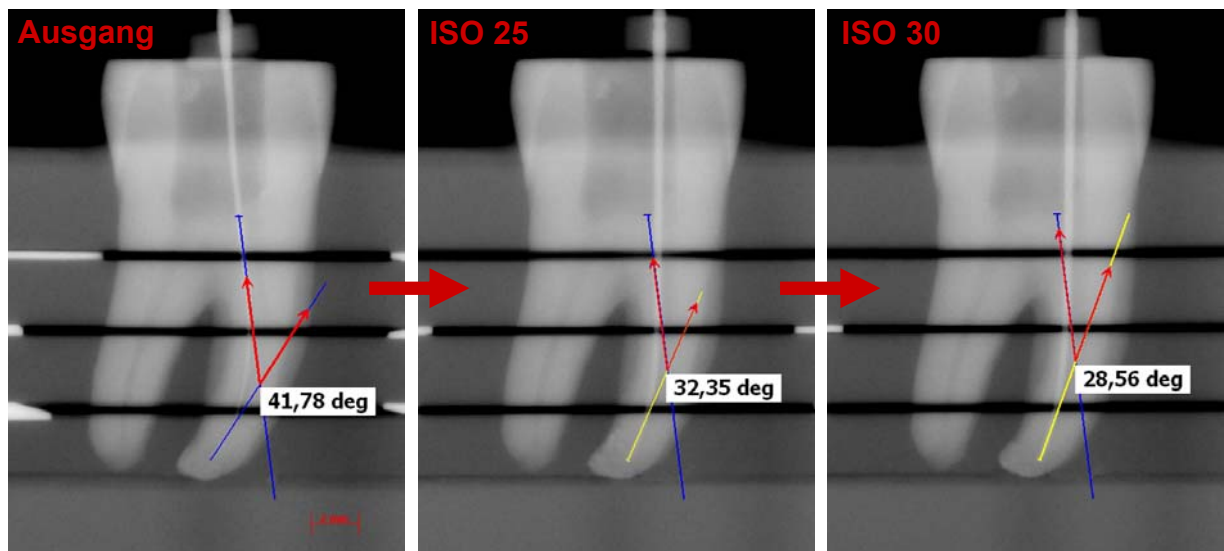


Abb. 4.13 Beispiel für die Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung in vestibulo-oraler Ebene nach der Aufbereitung bis ISO-Größe 025 (mittig) und nach ISO-Größe 030 (rechts). Die apikale Begradigung ergibt sich aus den entstehenden Winkeldifferenzen.

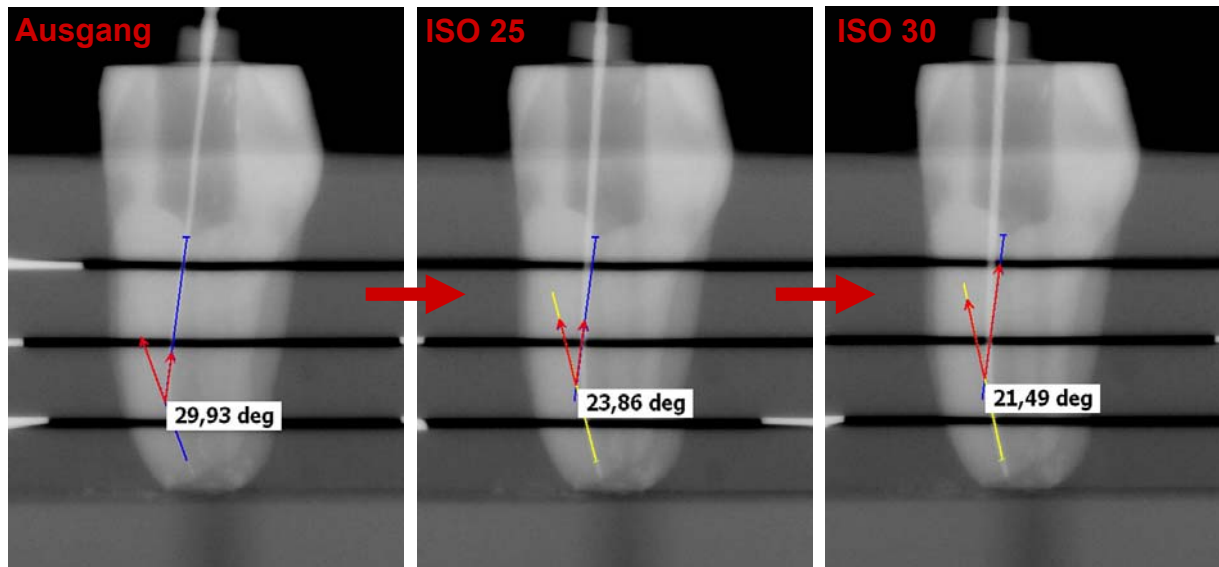


Abb. 4.14 Beispiel für die Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung in mesio-distaler Ebene nach der Aufbereitung bis ISO-Größe 025 (mittig) und nach ISO-Größe 030 (rechts). Die apikale Begradigung ergibt sich aus den entstehenden Winkeldifferenzen.

4.8 Anfertigung und Auswertung der Wurzelkanalquerschnitte

Für die Querschnittsanalysen des koronalen, mittleren und apikalen Wurzelkanalabschnittes wurden die Probenschnitte der bearbeiteten Wurzelkanäle nach Abschluss der Aufbereitung erneut mit dem Stereo Auflichtmikroskop fotografiert.

Vorbereitend für die Vermessungen wurde mit der Software Corel Draw (Version 12; Corel Corporation; Unterschleißheim, Deutschland) zunächst die ursprüngliche sowie die bearbeitete Wurzelkanalwand nachgezeichnet und anschließend beide Fotografien übereinandergelagert (vgl. Abb. 4.15). Hierbei wurde der bearbeitete Wurzelkanal halbtransparent über den unbearbeiteten Wurzelkanal gelegt und die Referenzlinien zur absoluten Deckungsgleichheit gebracht (Corel Draw). Die Visualisierung des ursprünglichen und des bearbeiteten Kanals in einem Bild und deren Lagebeziehung zueinander diente nun als Grundlage für die weiteren Vermessungen, die ebenfalls computergestützt mit der Software Axio Vision erfolgten.

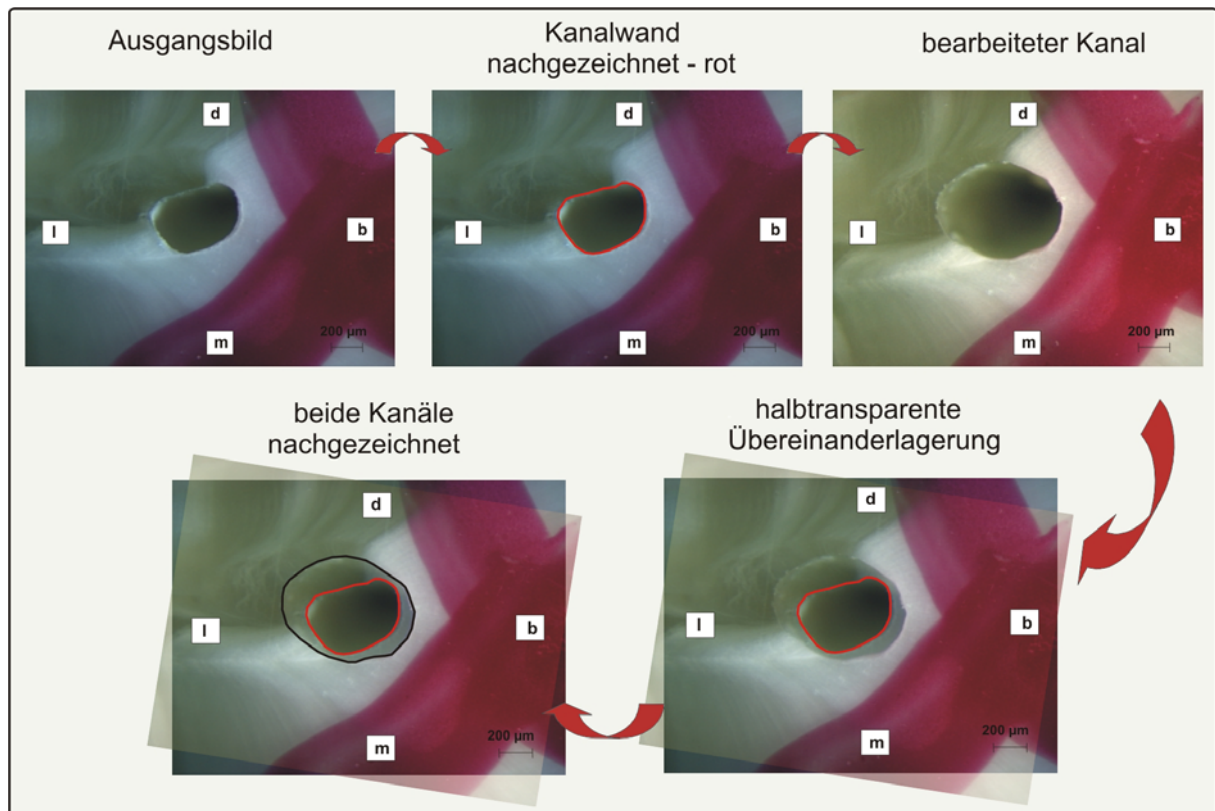


Abb. 4.15 Schematische Darstellung der Überlagerung und Durchzeichnung der Wurzelkanalquerschnitte als Vorbereitung für die Vermessung.

Prozentual nicht bearbeitete Kanalwand

Als Parameter der mechanischen Reinigungswirkung wurde im koronalen, mittleren sowie apikalen Wurzelkanalanteil der Anteil der nicht instrumentell bearbeiteten Kanalwand in % der Gesamtzirkumferenz bestimmt. Anhand der übereinandergelagerten Wurzelkanalquerschnitte und nachgezeichneten Kanalwände wurde die Analyse computergestützt durchgeführt (Axio Vision). Auf den zusammengesetzten Bildern konnte zunächst beurteilt werden, ob der bearbeitete Wurzelkanal noch in Berührung mit der unbearbeiteten Wand stand (vgl. Abb. 4.16). Bei zutreffenden Fällen erfolgte dann computergestützt die Vermessung dieser Strecke (Abb. 4.17). Im Anschluss konnte rechnerisch bestimmt werden, wie viel Prozent von der ursprünglichen Kanalwandzirkumferenz diese Strecke darstellt.



Abb. 4.16 Zwei Beispiele für übereinandergelagerte und durchgezeichnete Kanalwände. Rot umrandet ist die ursprüngliche, nicht bearbeitete Kanalwand. Die schwarze Linie repräsentiert die Lage und Ausdehnung der instrumentell bearbeiteten Wand. Das linke Bild zeigt eine Wurzelkanalwand, die nach ihrer Aufbereitung noch teilweise in Kontakt mit der unbearbeiteten steht (schwarze Pfeile). Im rechten Bild ist zu erkennen, dass die gesamte Kanalzirkumferenz instrumentell bearbeitet wurde und diese den ursprünglichen Kanalquerschnitt vollständig einschließt.

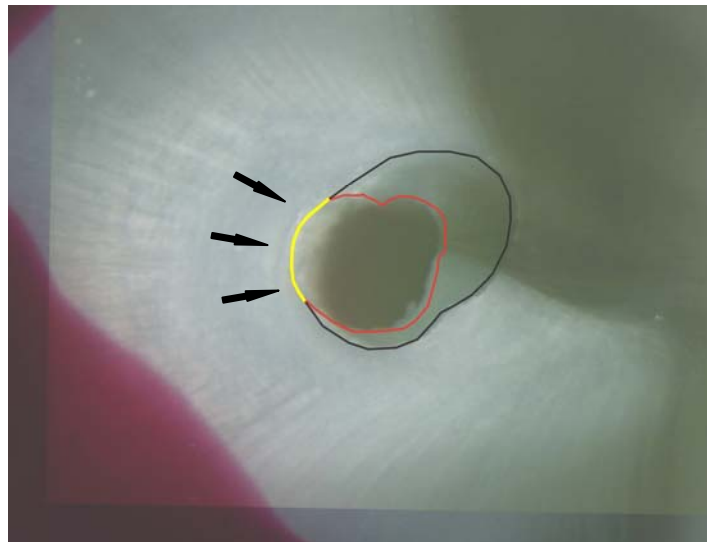


Abb. 4.17 Beispiel für eine nicht vollständig bearbeitete Wurzelkanalwand (aus Abb. 4.16 linkes Bild). Gelb markiert ist die Strecke, über die der ursprüngliche und der bearbeitete Wurzelkanal optisch nicht voneinander zu trennen sind und in Kontakt miteinander stehen (schwarze Pfeile). Dieser Bereich wurde als instrumentell unbearbeitet eingestuft und vermessen.

Nachfolgend konnte mit Hilfe der ermittelten Prozentwerte eine Einteilung der Proben entsprechend ihrer Ergebnisse in die vier Gruppen erfolgen:

- Gruppe 1: 0-25% der ursprünglichen Zirkumferenz hat noch Wandkontakt,
- Gruppe 2: 25-50% der ursprünglichen Zirkumferenz hat noch Wandkontakt,
- Gruppe 3: 50-75% der ursprünglichen Zirkumferenz hat noch Wandkontakt,
- Gruppe 4: >75% der ursprünglichen Zirkumferenz hat noch Wandkontakt.

4.9 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurden die Parameter

- apikale Begradigung (in zwei Ebenen, nach ISO 025 und 030)
- unbearbeitete Kanalwandbereiche
- Instrumentierungszeit und
- Frakturrate verwendet.

Die statistische Bearbeitung des Datenmaterials der vorliegenden Arbeit wurde mit einer handelsüblichen Software (SPSS 14.0 für Windows; SPSS, München, Deutschland) durchgeführt. Die Werte der Instrumentierungszeit wurden zunächst mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) auf Signifikanzen zwischen den verwendeten Aufbereitungssystemen geprüft. Im Falle einer vorliegenden Signifikanz erfolgte der Vergleich der einzelnen Gruppen mit einem Post-hoc-Test (Tukey B).

Für die Untersuchungsparameter "apikale Wurzelkanalbegradigung" und "Anteil an nicht bearbeiteter Wurzelkanalwand" wurde ein Overall-Vergleich zwischen den drei Gruppen mit Hilfe des Kruskal-Wallis-H-Test durchgeführt. Dieser ist ein parameterfreier statistischer Test und dient zum Vergleich von mehr als zwei unabhängigen Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenzen. Im Falle einer Signifikanz erfolgten bei der apikalen Begradigung Paarvergleiche zwischen den einzelnen Gruppen mit dem Mann-Whitney-U-Test. Für die Auswertung der unbearbeiteten Bereiche wurde eine Kreuztabelle mit anschließendem Chiquadrat-Test nach Pearson erstellt und auf Signifikanzen überprüft. Das Prinzip dieses Tests ist es, dass die Werte der zu überprüfenden Variablen in Klassen eingeteilt und dann die beobachteten Klassenhäufigkeiten mit den unter Normalverteilung zu erwartenden verglichen werden.

Ein Unterschied wurde (bei allen Tests) dann als statistisch signifikant definiert, wenn die Wahrscheinlichkeit p für sein Auftreten kleiner oder gleich der kritischen Irrtumswahrscheinlichkeit α von 5 % war ($p \leq 0,05$).

5. Ergebnisse

5.1 Apikale Wurzelkanalbegradigung

Der Parameter der Begradigung des Wurzelkanals im apikalen Bereich wurde nach der Aufbereitung bis ISO 025 sowie nach der Aufbereitung bis ISO 030 in beiden Ebenen bestimmt. Es erfolgte zunächst die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen, welche in Tabelle V dargestellt sind.

Tabelle V Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der apikalen Wurzelkanalbegradigung in vestibulo-oraler sowie mesio-distaler Ebene. Die hochgestellten Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede auf der Basis des Signifikanzniveaus $\alpha = 0.05$ (Mann-Whitney-U-Test).

System	Apikale Begradigung in <i>vestibulo-oraler</i> Ebene (in Grad)							
	ISO-Größe 025				ISO-Größe 030			
	MW	SD	Min	Max	MW	SD	Min	Max
Alpha-System	0.63 ^A	0.51	0.01	1.35	1.36 ^A	1.02	0.15	3.78
ProTaper Universal	2.71 ^{AB}	2.78	0.00	9.21	4.26 ^B	3.36	0.13	12.47
Manuelle Aufbereitung	2.87 ^B	2.97	0.07	9.43	4.41 ^B	3.69	0.45	13.22
P-Wert (Kruskal-Wallis)	0.043				0.012			

System	Apikale Begradigung in <i>mesio-distaler</i> Ebene (in Grad)							
	ISO-Größe 025				ISO-Größe 030			
	MW	SD	Min	Max	MW	SD	Min	Max
Alpha-System	1.72 ^A	1.64	0.03	6.42	2.43 ^A	1.88	0.1	7.0
ProTaper Universal	3.37 ^B	2.17	0.04	7.71	4.35 ^B	2.09	0.2	7.8
Manuelle Aufbereitung	3.46 ^B	2.93	0.07	11.73	4.66 ^B	3.82	0.8	16.4
P-Wert (Kruskal-Wallis)	0.028				0.019			

Der Overall-Vergleich zeigte, dass die apikale Begradigung nach ISO-Größe 025 und 030 in beiden Ebenen signifikant vom verwendeten System beeinflusst wurde ($p < 0,05$; Kruskal-Wallis-H-Test).

In vestibulo-oraler Ebene nach Aufbereitung der Wurzelkanäle bis zur ISO-Größe 025 war zu erkennen, dass bei der Alpha-System-Gruppe eine signifikant geringere apikale Begradigung im Vergleich zur manuellen Aufbereitung ($p = 0,016$; Mann-Whitney-U-Test) zu verzeichnen war. Die Ergebnisse ergaben weiterhin, dass die Verwendung des Alpha-Systems verglichen mit der ProTaper Universal Gruppe zu einer geringeren Begradigung führte, dieser Unterschied aber statistisch nicht signifikant war ($p = 0,061$; Mann-Whitney-U-Test). ProTaper Universal und die manuelle Aufbereitung zeigten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Begradigung ($p = 0,775$; Mann-Whitney-U-Test).

Bei Betrachtung der Wurzelkanäle nach Aufbereitung bis zur ISO-Größe 030 führte die Verwendung des Alpha-Systems in vestibulo-oraler sowie in mesio-distaler Ebene zu einer signifikant geringeren apikalen Wurzelkanalbegradigung im Vergleich zu ProTaper Universal ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test) und der manuellen Aufbereitung mit Stahlinstrumenten ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test). Der Vergleich von ProTaper Universal mit der Gruppe der Edelstahlinstrumente zeigte keinen signifikanten Unterschied ($p > 0,05$; Mann-Whitney-U-Test).

In mesio-distaler Ebene zeigte nach Aufbereitung bis ISO-Größe 025 das Alpha-System eine statistisch signifikant geringere Begradigung des Wurzelkanals verglichen mit ProTaper Universal ($p = 0,023$; Mann-Whitney-U-Test) sowie der manuellen Aufbereitung ($p = 0,019$; Mann-Whitney-U-Test), die keine Unterschiede aufwiesen ($p = 0,744$; Mann-Whitney-U-Test).

Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Ebenen hinsichtlich der Ausprägung der Wurzelkanalbegradigung konnte nicht gezeigt werden ($p > 0,05$; Wilcoxon-Test).

5.2 Prozentualer Anteil nicht bearbeiteter Kanalwand

Die Analyse der übereinandergelagerten Bilder ließ erkennen, dass alle verwendeten Systeme unbearbeitete Kanalwandbereiche unabhängig von der Lokalisation im Wurzelkanal hinterließen.

Tabelle VI Kreuztabelle für die apikale Wurzelkanalquerschnittsanalyse. Der prozentuale Anteil der ursprünglichen Kanalwandzirkumferenz, welcher instrumentell nicht bearbeitet war, wurde bestimmt und die Proben entsprechend ihrer Ergebnisse in vier Gruppen eingeteilt.

System		Anteil an unbearbeiteter Wurzelkanalwand (%)			
		0 - 25 %	>25 %	>50 %	>75 %
Alpha-System	Anzahl	14	1	0	0
	% von System	93.3 %	6.7 %	0.0 %	0.0 %
ProTaper Universal	Anzahl	8	5	2	0
	% von System	53.3 %	33.3 %	13.3 %	0.0 %
Manuelle Aufbereitung	Anzahl	3	10	1	1
	% von System	20.0 %	66.6 %	6.7 %	6.7 %

Der Anteil an nicht bearbeiteter Wurzelkanalwand wurde nur im apikalen Wurzelkanalabschnitt signifikant durch das verwendete Systems beeinflusst ($p = 0,001$; Kruskal-Wallis-H-Test). Das Alpha-System wies hier mit über 93% der Fälle eine zwischen 75 bis 100% bearbeitete Kanaloberfläche auf und unterschied sich damit signifikant zur manuellen Aufbereitungstechnik ($p = 0,01$; Chi-Quadrat-Test), welche dies nur in 20% der Fälle erreichte, jedoch in 66% nicht bearbeitete Bereiche zwischen 25 bis 50% hinterließ. Bei dem Vergleich der manuellen Aufbereitung und ProTaper Universal konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der unbearbeiteten Kanalwandabschnitte aufgezeigt werden ($p = 0,153$; Chi-Quadrat-Test). Die Verwendung von ProTaper Universal führte zu größeren unbearbeiteten Kanalwandabschnitten verglichen mit dem Alpha-System, jedoch war dies nur schwach signifikant ($p = 0,043$; Chi-Quadrat-Test).

5.3 Instrumentierungszeit

Die Instrumentierungszeit wurde in Sekunden ermittelt und zunächst die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen bestimmt, welche in der Tabelle VII zusammengefasst sind.

Tabelle VII Mittelwert und Standardabweichung der Instrumentierungszeit (in Sek.) der verschiedenen Aufbereitungssysteme. Die hochgestellten Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede auf der Basis des Signifikanzniveaus $\alpha = 0.05$ (Tukey-B).

System	Instrumentierungszeit (s)	
	Mittelwert	Standardabweichung
Alpha-System ^A	103,20	13,50
Pro Taper Universal ^B	150,73	18,87
Manuelle Aufbereitung ^C	238,33	35,12

Die Überprüfung der Werte mit der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) und folgendem Post-hoc-Test (Tukey-B) ergab, dass die Instrumentierungszeit signifikant von dem verwendeten Aufbereitungssystem ($p < 0,0005$; ANOVA) beeinflusst wurde.

Diese war mit dem aus fünf Feilen bestehenden Alpha-System signifikant kürzer verglichen mit dem aus 6 Feilen bestehenden ProTaper Universal, welches sich wiederum signifikant von der Handaufbereitung mit acht Instrumenten unterschied ($p < 0,05$; Tukey-B).

5.4 Frakturrate

Bei keinem der verwendeten Systeme waren Instrumentenfrakturen zu verzeichnen.

6. Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, die beiden NiTi-Systeme ProTaper Universal und Alpha-System hinsichtlich ihrer Praktikabilität und Effektivität zu untersuchen und mit der manuellen Aufbereitung mit Edelstahlfeilen zu vergleichen.

Die Arbeitshypothese dieser Untersuchung wurde bestätigt; die Ergebnisse ließen signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Systemen hinsichtlich Formgebung und Arbeitszeit erkennen.

6.1 Diskussion von Material und Methode

In-vitro-Untersuchungen mit dem Fokus der Evaluation von Wurzelkanalaufbereitungssystemen verwenden extrahierte, humane Zähne [Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005; Schäfer et al. 2006] oder simulierte Wurzelkanäle in Kunststoffklötzchen [Yun und Kim 2003; Yoshimine et al. 2005; Schäfer et al. 2006; Schirrmeister et al. 2006]. Die konfektionierten Kunststoffmodelle weisen künstliche Kanäle mit festgelegtem Krümmungsradius sowie einer definierten Länge auf und ermöglichen eine standardisierte Wurzelkanalgeometrie, verbunden mit einer guten Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen [Peters 2004; Hülsmann et al. 2005]. Besonders gut eignen diese sich für die Untersuchungen der Präparationsform sowie zur planimetrischen Ermittlung des Materialabtrags [Tepel et al. 1993; Schäfer 1996; Hülsmann et al. 2005]. Die Kunststoffmodelle unterscheiden sich jedoch in ihrem Abriebverhalten und in der Größe der anfallenden Dentinspäne von natürlichen Zähnen und können die natürliche Komplexität des Wurzelkanallumens (Buchten, Nischen, isthmusartige Verbindungen, Seitenkanälchen, apikale Verzweigungen, Dentintubuli etc.) nicht ausreichend reproduzieren [Hülsmann 2000; Hülsmann et al. 2005]. Bedingt durch die im Vergleich zu Dentin ungleiche Mikrohärtigkeit des Kunststoffes resultiert ein unterschiedliches Abriebverhalten. In der Literatur wird die Mikrohärtigkeit von Dentin pulpanah mit 35-40 kg/mm², die von Kunststoffmaterialien jedoch nur mit 20-22 kg/mm² angegeben [Weine et al. 1975; Eldeeb und Boraas 1985; Spyropoulos et al. 1987; Miserendino et al. 1988]. Folglich wird für die Bearbeitung des natürlichen Kanalwanddentins doppelt so viel Kraft benötigt wie für den Abtrag an Kunststoffmodellen [Lim und Webber 1985]. Auch die Größe der abgefeilten Späne scheint unterschiedlich zu sein, und die Kunststoffspäne lassen sich erheblich schwerer durch die Spülung entfernen. In der Apikalregion kann es daher häufiger zu Verblockungen kommen [Weine et al. 1975; Lim und Webber 1985]. Die Verwendung von natürlichen, humanen Zähnen reflektiert naturgemäß eher die klinische Situation. Dennoch bleibt festzuhalten, dass aufgrund der großen Variabilität und Komplexität des

Wurzelkanallumens sowie der unterschiedlichen Härte des natürlichen Dentins eine Standardisierung der Proben kaum möglich ist [Hülsmann et al. 2005].

Mit dem Ziel, die große Variabilität der dreidimensionalen Wurzelkanalkonfigurationen zu reduzieren und eine annähernde Vergleichbarkeit zwischen den Gruppen zu schaffen, wurden in die Untersuchung nur die mesialen Wurzelkanäle erster und zweiter Unterkiefermolaren einbezogen, die im apikalen Bereich in 100 % der Fälle eine Kanalkrümmung aufweisen [Cunningham und Senia 1992]. Aufgrund der sehr unterschiedlich gekrümmten Wurzelkanäle erfolgte zunächst die Bestimmung der initialen Krümmungswinkel. Anhand derer konnten die Proben je nach Ausprägung der Wurzelkanalkrümmung gleichmäßig auf drei Versuchsgruppen eingeteilt werden.

Für die Bewertung der Formgebung und insbesondere für die Beurteilung verbliebener, nicht bearbeiteter Kanalbereiche ist eine annähernd identische Größe des ursprünglichen Kanals von Bedeutung. Aufgrund dessen wurden nur Zähne in die Untersuchung eingeschlossen, deren Wurzelkanaldurchgängigkeit mit einem Reamer der ISO-Größe 010 nicht überschritt und die einen getrennten Verlauf der mesialen Wurzelkanäle aufwiesen. Die apikale Aufbereitungsgröße wird als einer der Parameter betrachtet, die für den Therapieerfolg maßgeblich mit verantwortlich sind und ist eng mit der Anatomie des apikalen Wurzelkanaldrittels assoziiert. Sie ist nicht nur für die vergleichende Betrachtung von einzelnen Aufbereitungssystemen notwendig, sondern bestimmt maßgeblich deren Reinigungswirkung.

In der Literatur wird berichtet, dass eine größere apikale Aufbereitung die Reinigung des Wurzelkanales positiv beeinflusst [Wu und Wesselink 1995; Card et al. 2002; Bartha et al. 2006; Weiger et al. 2006]. Es bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass eine Zunahme der Aufbereitungsgröße die Wurzel insbesondere im apikalen Bereich schwächt und das Risiko von Aufbereitungsfehlern wie einer Kanalverlagerung, Stufenbildungen bis hin zu Perforationen steigt [Wu et al. 2003]. Durch die von den Herstellern empfohlenen Aufbereitungstechniken, den damit verbundenen Sequenzen und den limitierten ISO-Größen der in dieser Studie zu untersuchenden Systeme wurde apikal bis zu einer ISO-Größe 030 aufbereitet.

Für die Evaluation der Aufbereitungsqualität und Praktikabilität eines endodontischen Instrumentariums wird ein Studiendesign benötigt, welches eine Standardisierung und Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen erlaubt, die klinische Situation annähernd simuliert sowie die Erhebung aller für die Untersuchung benötigten Parameter ermöglicht. Die Literatur zeigt, dass Untersuchungen zur Morphologie der Wurzelkanäle und ihrer aufbereitungsbedingten Veränderungen mit verschiedenen Methoden durchgeführt wurden [Campos und del Rio 1990; Hülsmann et al. 1999]. In einigen Arbeiten erfolgte die dreidimensionale Darstellung des

Wurzelkanallumens und die Beurteilung von aufbereitungsbedingten Veränderungen ohne Zerstörung des Zahnes mit einem μ CT [Peters et al. 2000; Peters et al. 2001; Peters et al. 2003]. Kanalvolumen, die Kanaloberflächen vor und nach der Aufbereitung sowie Krümmungsveränderungen können mit diesem Verfahren problemlos in allen Dimensionen erfasst werden. Allerdings stehen die hohen Kosten und der Zeitaufwand für die Erstellung der Daten diesem Verfahren entgegen. Eine der bekanntesten Methoden zur Untersuchung von Wurzelkanälen ist die Durchführung mit Hilfe eines Muffelsystems. Im Jahr 1987 wurde dieses erstmals von *Bramante et al.* beschrieben und erfuhr seitdem viele Modifikationen [Bramante et al. 1987; Campos und del Rio 1990; McCann et al. 1990; Hülsmann et al. 1999]. Die Besonderheit des Bramante-Modells lag in der reproduzierbaren Fixierung der Probekörper, und es war damit möglich, die Wurzelkanalquerschnitte vor und nach der Aufbereitung zu beurteilen. Um die in Acrylharz eingebetteten Zähne wurden Muffelseitenteile aus Gips hergestellt, die abnehmbar waren. Die Zähne konnten anschließend zersägt, die Schnitte wieder in der Gipsmuffel fixiert und aufbereitet werden. Es war erstmals möglich, die Wurzelkanalquerschnitte vor und nach der Aufbereitung sowie in den einzelnen Wurzelregionen zu beurteilen, auch wenn der Zahn hierfür zerteilt werden musste. Allen weiteren folgenden Modifikationen des Muffelsystems war es gemein, dass sie aus Seitenteilen bestanden, welche verschiedene horizontale bzw. vertikale Rillen zur exakten Repositionierung und Fixierung der Proben aufwiesen [Campos und del Rio 1990; McCann et al. 1990]. In den folgenden Weiterentwicklungen kam zu der Möglichkeit der Querschnittsbetrachtung die Beurteilung der Kanäle in ihrer Längsachse hinzu. Um mögliche aufbereitungsbedingte Begradigungen ermitteln zu können, wurden Vorrichtungen arretiert, die die Anfertigung reproduzierbarer Röntgenaufnahmen ermöglichten [Southard et al. 1987; Sydney et al. 1991; Hülsmann et al. 1999].

In der vorliegenden Arbeit wurde eine weitere Modifikation des Muffelsystems aus Messing entworfen, mit dem Ziel, die einzelnen Parameter im Querschnitt sowie in mehreren Ebenen im Längsschnitt unter reproduzierbaren Bedingungen evaluieren zu können. Die Einzelteile der Muffel wurden hierbei so konstruiert, dass eine einfache und gleichzeitig exakte Repositionierung der Probekörper bzw. -teile in die Vorrichtung erfolgen konnte. Durch den konisch gestalteten Innenraum, die asymmetrisch angeordneten, dreiecksförmigen Vorsprünge an den Seitenteilen sowie durch die Abdeckung mit den vertikalen Verschraubungen konnte ein leichtes Einbringen, Fixieren und Entfernen der Proben und deren Unverschieblichkeit in der Horizontalen und Vertikalen sichergestellt werden. Um eine Querschnittsanalyse der Wurzel vornehmen zu können, mussten die Zähne vor der Aufbereitung horizontal zersägt werden. Mit dem Ziel, das Risiko einer möglichen Stufenbildung beim Zusammensetzen der Probekörpereinzerteile innerhalb der Wurzel zu minimieren, wurde das Sägeverfahren

mittels einer Innenlochsäge gewählt. Dieses führt durch die Dicke und die unvermeidbare Schwingung des Sägeblattes zu einem definierten Schnittverlust von 300 µm, welcher anschließend mit Metallplättchen derselben Stärke ausgeglichen werden konnte. Dadurch war die Betrachtung der Wurzelkanalquerschnitte vor, während und nach der Aufbereitung ohne Veränderung des ursprünglichen Kanalverlaufes in allen drei Dimensionen möglich.

Ein weitere wichtige Modifikation bietet die Möglichkeit den Zahn in mehreren Ebenen (vestibulo-oral, mesial-distal) in seiner Längsachse zu analysieren. Durch vier abnehmbare Seitenteile und die Befestigung eines Röntgenvisierringes an allen Seiten der Bodenplatte konnte die Evaluation in zwei in 90° aufeinanderstehenden Ebenen erfolgen.

6.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

6.2.1 Begradigung

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen eine aufbereitungsbedingte apikale Verlagerung des Wurzelkanals bei der manuellen Aufbereitung mit Edelstahlfeilen sowie bei der Verwendung von rotierenden NiTi-Instrumenten. In vestibulo-oraler und mesio-distaler Untersuchungsebene waren Verlagerungen des Kanals zu verzeichnen, wobei kein signifikanter Unterschied in der Ausprägung der Begradigung in den beiden Ebenen festgestellt werden konnte.

Mit der Verwendung von rotierenden NiTi-Systemen konnte im Vergleich zu der manuellen Aufbereitung mit Edelstahlfeilen die Prävalenz und das Ausmaß der Kanalverlagerung reduziert werden [Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003; Schäfer et al. 2004]. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen zeigten andere Studien keine Überlegenheit der NiTi-Systeme [Guelzow et al. 2005; Hartmann et al. 2007]. Mögliche Ursachen für diese gegensätzlichen Resultate liegen in der unterschiedlichen Versuchsdurchführung, Auswertungsmethodik, Aufbereitungstechnik sowie den Instrumenten. Des Weiteren haben der Operateur, seine Vertrautheit mit dem zu verwendenden System, seine manuelle Geschicklichkeit sowie die Handhabung der Instrumente einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse [Mandel et al. 1999]. Zusätzlich sollte der Aspekt des Instrumentendesigns Berücksichtigung finden, da dieses die Formgebung des Kanals im besonderen Maße mitbestimmt.

Edelstahlinstrumente zeichnen sich durch eine relativ geringe Flexibilität aus, die sich mit zunehmendem Instrumentendurchmesser weiter verringert und bei deren Anwendung in gekrümmten Kanälen beträchtliche auf das Instrument wirkende Kräfte

entstehen können [Craig et al. 1968; Bergmans et al. 2001; Schäfer und Tepel 2001]. Eine hohe Biegesteifheit eines Instrumentes kann ursächlich für eine Begradigung und Verlagerung des Wurzelkanales sein und weitere Aufbereitungsfehler, wie die Ausbildung von Ledges, Zips, Elbows oder Perforationen bedingen [Schäfer et al. 2003; Calberson et al. 2004]. Darüber hinaus verblieben durch eine Kanalverlagerung bedingt größere unbearbeitete Kanalwandbereiche [Peters et al. 2003; Calberson et al. 2004]. Untersuchungen zu hochflexiblen NiTi-Instrumenten ließen erkennen, dass die Formgebung des Wurzelkanales verbessert und Aufbereitungsfehler minimiert werden können [Hülsmann et al. 2003; Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005; Sonntag et al. 2007]. Die Verwendung der Instrumente führte zu einem guten Erhalt der natürlichen Kanalkrümmung und zu einem gleichmäßigen Materialabtrag an der Innen- sowie Außenkurvatur des Wurzelkanales. Dennoch konnten aufbereitungsbedingte Fehler auch mit rotierenden NiTi-Instrumenten nicht vollständig vermieden werden und es bestanden Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen [Yun und Kim 2003; Yoshimine et al. 2005; Schäfer et al. 2006].

Das seit 2006 auf dem Dentalmarkt erhältliche ProTaper Universal ist eine Weiterentwicklung des bereits in vielen Studien evaluierten NiTi-Systems ProTaper. Zu den Veränderungen im Instrumentendesign gehört eine stärker abgerundete Führungsspitze bei den Finishing-Feilen, welche durch einen kleineren, flacheren Übergangswinkel der Schneiden zur Spitze hin umgesetzt worden ist. Ziel dieser abgewandelten Spitzte war die Sicherheit des Instrumentariums zu erhöhen und eine bessere Berücksichtigung des natürlichen Kanalverlaufes während der Aufbereitung zu erreichen. Um eine bessere Verteilung der Kraftbelastung bei den Feilen S1 zu S2 zu F1 zu schaffen, wurde die Konizität im Schneidebereich der Shaping-Feile F2 leicht modifiziert. Zusätzlich sollte die Flexibilität der Finishing-Feile F3 verbessert werden, was man durch eine verringerte Querschnittsfläche mit Auskehlungen entlang der Schneiden zu erreichen versuchte. Trotz dieser Designveränderungen des ProTaper Universal Systems lassen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ähnliche Resultate wie bei der Verwendung des klassischen ProTaper erkennen [Peters et al. 2003; Calberson et al. 2004; Sonntag et al. 2007].

In beiden Ebenen (vestibulo-oral und mesio-distal) führte die Aufbereitung mit dem ProTaper Universal System zu einer ausgeprägteren apikalen Begradigung als mit dem Alpha-System. Eine mögliche Ursache liegt im unterschiedlichen Instrumentendesign der Systeme. Frühere Untersuchungen haben einen Zusammenhang zwischen dem Biegemoment und der Querschnittsfläche, der Feilengröße sowie der Konizität herausgestellt [Schäfer und Tepel 2001; Schäfer et al. 2003]. Die Instrumente des ProTaper Universal Systems besitzen nicht nur hohe sondern auch multiple Konizitäten innerhalb des Arbeitsteiles einer Feile, wohingegen

jedem Instrument des Alpha-Systems nur eine konstante Konizität zugeordnet ist, die ihr Maximum bei 6 % erreicht. Bei ProTaper Universal werden an der Instrumentenspitze bis zu 11 % Steigung erreicht, wohingegen bei der apikalen Aufbereitung bei den Alpha-System Instrumenten die Konizitäten bei 2 % liegen. Die Finishing-Feilen bei ProTaper Universal verfügen darüber hinaus über eine umgekehrte Konizität (reverse taper), das heißt, die unteren drei Millimeter des Instrumentenarbeitsteiles weisen eine höhere Konizität auf (F1: 7 %, F2: 8 %, F3: 9 %) im Vergleich zu den restlichen Bereichen der Schneide (F1, F2, F3: 5,5 %). Diese innerhalb des Arbeitsteiles absteigende Konizität verbessert auf der einen Seite die Flexibilität und Beanspruchbarkeit der Instrumente, auf der anderen Seite unterliegen die Bereiche der Instrumentenspitzen einer zunehmenden Biegesteifheit. Verbunden mit einer Erhöhung der Konizität ist eine Zunahme der Querschnittsfläche, die eine Abnahme der Flexibilität zur Folge hat, was wiederum zu einer Verlagerung und Begradigung des Wurzelkanales während der Aufbereitung führen kann [Bergmans et al. 2001]. Folglich kann es während der Aufbereitung gekrümmter Kanäle zum Auftreten hoher seitwärts gerichteter Kräfte kommen, die eine Verlagerung des Kanales bedingen.

Bei Untersuchungen zu dem klassischen ProTaper-System wurde über unterschiedliche Ausprägungen von Wurzelkanalbegradigungen, Verlagerungen und Aufbereitungsfehlern berichtet [Peters et al. 2003; Calberson et al. 2004; Yoshimine et al. 2005; Sonntag et al. 2007]. Die Begradigungen tendierten im Mittelpunkt der Krümmung in Richtung der inneren Krümmung (Furkation, distal) und im apikalen Bereich in Richtung der Außenseite der Krümmung (mesial) [Calberson et al. 2004; Sonntag et al. 2007]. Eine Studie, die drei rotierende NiTi-Systeme evaluierte, berichtete über eine ausgeprägtere Tendenz zur Begradigung sowie Ausbildung von Ledges und Zips bei der Verwendung von ProTaper verglichen mit RaCe und K3, die beide zu einem deutlich besseren Ergebnis führten und einen gleichmäßigen Materialabtrag auch im apikalen Bereich aufwiesen [Yoshimine et al. 2005]. Die Autoren vermuteten als eine der Hauptursachen die multiplen und hohen Konizitäten und empfahlen zur apikalen Aufbereitung gekrümmter Kanäle die Verwendung von flexiblen Instrumenten mit einer geringen Konizität, wie bspw. K3 und RaCe [Yoshimine et al. 2005]. Diese Ergebnisse werden von zwei weiteren Untersuchungen bestätigt, die ebenfalls ausgeprägtere Begradigungen nach der Verwendung von ProTaper verglichen mit Mtwo, K3, ProFile, GT Rotary und Quantec zeigten [Yun und Kim 2003; Sonntag et al. 2007]. Im Gegensatz zu diesen Beobachtungen war in zwei weiteren Studien die Aufbereitung mit ProTaper hinsichtlich der Ausprägung einer Kanalverlagerung anderen NiTi-Systemen nicht unterlegen [Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005].

Die Verwendung des Alpha-Systems führte in der vorliegenden Arbeit zu einem gleichmäßigen Materialabtrag im apikalen Wurzelkanalabschnitt mit einem guten Erhalt der natürlichen Kanalkrümmung und nur geringen Abweichungen von der Hauptlängsachse. Mit Ausnahme der Eingangserweiterungsfeile (AF 10) sind alle Instrumente dieses rotierenden NiTi-Systems durch einen pentagonförmigen Querschnitt charakterisiert. Die Anordnung der Schneiden führt zu einem leicht positiven Spanwinkel sowie einem verhältnismäßig kleinen Spanraum für den Abtransport der Dentinspäne [Schäfer und Oitzinger 2008]. Eine mögliche Erklärung für die geringere apikale Begradigung könnte in der geringen Biegesteifheit aufgrund einer kleinen und konstanten Konizität entlang des Arbeitsteiles der Instrumente liegen [Schäfer et al. 2003]. Die überlegene Flexibilität reduziert die Belastung an den Schneiden, seitwärts gerichtete Kräfte werden minimiert und die Gefahr der Kanalverlagerung während der Aufbereitung verringert [Schäfer et al. 2003]. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Form und Fläche des Querschnittes die Biegeeigenschaften eines Instrumentes maßgeblich beeinflussen [Schäfer und Tepel 2001; Schäfer et al. 2003]. Die Fläche eines Querschnittsdesigns mit den drei positiven Spiralkantendesigns war im Vergleich zu einem U-shape-Design mit Radial lands bei einem identischen Querschnittsdurchmesser um 30 % größer und führte zu einer geringeren Flexibilität [Turpin et al. 2000; Turpin et al. 2001].

Ähnliche Beobachtungen wurden in einer weiteren Studie berichtet. Hier wurde eine höhere Biegesteifheit des dreiseitig konvexen Querschnitts nachgewiesen, welcher eine um 30 % größere Fläche aufwies, verglichen mit einem U-shape-Design mit Radial lands [Berutti et al. 2003]. Die Feilen des Alpha-Systems besitzen einen pentagonförmigen Querschnitt, welcher wahrscheinlich zu einem massiven Instrumentenkern mit einer großen Querschnittsfläche führt und eine geringe Flexibilität des Instrumentes vermuten lässt. Des Weiteren könnte der kleine Spanraum einen insuffizienten Abtransport der Dentinspäne bedingen und apikale Blockaden verursachen [Bergmans et al. 2001]. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können diese Annahmen nicht bestätigen und bleiben rein spekulativ, da das Alpha-System das einzig bekannte NiTi-System mit einem pentagonförmigen Instrumentenquerschnitt ist und keine publizierten Untersuchungen über dieses Designmerkmal vorliegen. In der vorliegenden Untersuchung scheint bei den beiden NiTi-Systemen ProTaper Universal und Alpha-System die Konizität einen größeren Einfluss auf die Flexibilität zu haben als das Querschnittsdesign, da unter den gegebenen Versuchsbedingungen die Aufbereitung mit dem Alpha-System zu einer signifikant geringeren apikalen Begradigung führte.

Die Oberflächenhärte von NiTi-Instrumenten ist im Vergleich zu Edelstahlinstrumenten geringer. Dies führt zu einer reduzierten Schneidleistung sowie

zu einer geringeren Verschleißfestigkeit der NiTi-Instrumente [Brockhurst und Hsu 1998; Bergmans et al. 2001; Schäfer 2002; Schäfer und Oitzinger 2008]. Mit dem Ziel, die Oberflächenhärte an den Schneiden der NiTi-Instrumente zu erhöhen und die Verschleißbeständigkeit zu verbessern, wurden verschiedene Nachbehandlungsverfahren entwickelt. In einigen Studien wurde nachgewiesen, dass Nitrierprozesse bzw. Stickstoffionen-Implantationen auf der Oberfläche von NiTi-Instrumenten eine Anhebung der Oberflächenhärte, eine Erhöhung der Schneidleistung sowie eine Verbesserung der Abriebbeständigkeit bewirken können [Rapisarda et al. 2000; Rapisarda et al. 2001]. Eine ähnliche Technologie liegt der sogenannten PVD-Beschichtung (Physical Vapour Deposition) zugrunde, bei der die aufgetragene Schichtstärke zwischen 1-7 µm an Dicke variiert und nicht zu ungewünschten Verrundungen der Schneidekanten führt, sondern aufgrund einer sehr hohen Härte (ca. 2200 HV) deutlich zum Abriebschutz der Schneidekanten beiträgt [Schäfer 2002]. Basierend auf experimentellen Untersuchungen konnte nach derartigen Beschichtungen eine signifikante Steigerung in der Schneidleistung der Instrumente belegt werden [Schäfer 2002; Schäfer 2002]. Im Gegensatz dazu konnte eine erst kürzlich veröffentlichte Studie diese Ergebnisse jedoch nicht untermauern. Die Ergebnisse zeigten keinen signifikanten Einfluss der PVD-Beschichtung des Alpha-Systems auf die Schneidleistung. Die Systeme Mtwo, RaCe sowie FlexMaster waren diesem signifikant überlegen [Schäfer und Oitzinger 2008]. Das Querschnitts- und Schneidendesign der untersuchten Instrumente hatte offenbar einen größeren Einfluss auf die Schneidleistung und der Einfluss der Oberflächenbeschichtung bei unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen ist noch nicht vollständig geklärt [Schäfer und Oitzinger 2008].

6.2.2 Unbearbeitete Wurzelkanalwandbereiche

Die Betrachtung des Wurzelkanalquerschnittes vor und nach der Aufbereitung lässt nicht nur eine Beurteilung der Formgebung zu, sondern ermöglicht auch Rückschlüsse auf die mechanische Reinigungswirkung eines Systems. Der aufbereitete Wurzelkanal sollte den unbearbeiteten vollständig umschließen; kein Wandbereich sollte unbearbeitet bleiben (vgl. Abb. 4.16). In der vorliegenden Arbeit ließ die Auswertung der zusammengesetzten Bilder des unbearbeiteten und aufbereiteten Kanales erkennen, dass die manuelle Aufbereitung mit den Edelstahlfeilen sowie die Verwendung von NiTi-Instrumenten mechanisch unbearbeitete Wurzelkanalwandbereiche in allen drei Regionen (koronal, mittig, apikal) hinterließ. Während im koronalen sowie mittleren Wurzelkanaldrittel eine gute Ausformung des Kanales mit nur wenigen unbearbeiteten Bereichen zu erkennen war, wurde im apikalen Bereich der

Anteil an unbearbeiteter Kanalwand signifikant vom verwendeten System beeinflusst. Die Verwendung des Alpha-Systems führte zu besseren Ergebnissen mit geringen verbleibenden unbearbeiteten Wandbereichen. Die Ergebnisse des ProTaper Universal waren den Edelstahlfeilen überlegen, blieben jedoch deutlich hinter dem Alpha-System zurück.

Die Resultate der vorliegenden Untersuchung werden durch die Beobachtungen vorheriger Arbeiten untermauert. Besonders im apikalen Wurzelkanalabschnitt verbleiben Reste von Pulpagewebe und Debris nach der Aufbereitung [Foschi et al. 2004; Prati et al. 2004]. Die im apikalen Drittel vermehrt zu findenden unbearbeiteten Wurzelkanalwandbereiche waren meistens auf der konkaven Seite der Krümmung lokalisiert [Peters et al. 2001; Hübscher et al. 2003; Peters et al. 2003; Paqué et al. 2005]. Dreidimensionale Untersuchungen von Wurzelkanälen mit Hilfe eines μ CT's zeigten unbearbeitete Wurzelkanalwandbereiche nach der Aufbereitung mit dem klassischen ProTaper-System von 43 bis 49 % [Peters et al. 2003], von 25 bis 30 % nach der Verwendung von Endo-EZE [Paqué et al. 2005], von 38 bis 47 % bei der Verwendung von FlexMaster [Hübscher et al. 2003]; mehr als 35 % der ursprünglichen Wurzelkanalwand blieben nach der Aufbereitung mit ProFile, Lightspeed und GT rotary uninstrumentiert [Peters et al. 2001].

Die Überlegenheit des Alpha-Systems in der vorliegenden Arbeit könnte vermutlich seiner Flexibilität zugeschrieben werden. Ein biegsames Instrument führt zu einer geringeren Verlagerung des Wurzelkanals verbunden mit einem zentrierten Arbeitsverhalten im Wurzelkanal und einem allseitigen Materialabtrag mit wenig verbleibenden unbearbeiteten Wandbereichen. Ein sehr biegesteifes Instrument hat bei der Anwendung in einem gekrümmten Kanal das Bestreben, sich zu begradigen; dies kann Kanalverlagerungen verursachen, die folglich zu einem ungleichmäßigen Materialabtrag führen und zu unbearbeiteten Bereichen führen.

Die klinische Relevanz des Parameters 'bearbeitete Oberfläche' ist noch nicht abschließend geklärt. Untersuchungen haben gezeigt, dass in Abhängigkeit von der Zeit sowie von der Mikroorganismenart eine Besiedlung der Dentintubuli bis in mehrere 100 μ m Tiefe erfolgen kann [Haapasalo und Orstavik 1987; Orstavik und Haapasalo 1990; Sen et al. 1995; Hülsmann 2000]. Eine rein mechanische Reinigung ist als unzureichend einzustufen, da unbearbeitete Wandbereiche verbleiben, in denen die Bakterien weiter persistieren können [Chuste-Guillot et al. 2006]. Mit Hilfe einer gegen die bakterielle Mischflora zielenden chemischen Desinfektion kann die Reinigungswirkung erheblich verbessert werden und auch in den mechanisch insuffizient gereinigten Bereichen eine suffiziente Desinfektion ermöglichen [Hülsmann 2000].

In der vorliegenden Arbeit können aufgrund der Auswertungsmethodik nur Rückschlüsse hinsichtlich der rein mechanischen Reinigungswirkung gezogen werden. Die Limitierung der Aussagekraft liegt in der reinen Auswertung der Wurzelkanalquerschnitte begründet, da aufgrund der Betrachtung des Wurzelkanales in den drei repräsentativen Bereichen koronal, mittig und apikal kein Rückschluss auf den gesamten Wurzelkanal möglich ist. Möchte man die Reinigungswirkung, bestehend aus mechanischer und chemisch-medikamentöser Komponente, beurteilen, so ist die Betrachtung des Wurzelkanallängsschnittes unter einem Rasterelektronenmikroskop indiziert, das eine Beurteilung von Debris und Smear Layer ermöglicht.

6.2.3 Instrumentierungszeit

Die Erhebung des Parameters Arbeitszeit soll die Effizienz und die klinische Praktikabilität eines Systems widerspiegeln. Wie lange braucht der Zahnarzt mit dem rotierenden NiTi-Instrumentarium für die Aufbereitung eines Molaren, geht es schneller als mit der manuellen Aufbereitung mit Edelstahlfeilen, welches System benötigt am wenigsten Zeit? Das sind Fragen, die für den Praktiker relevant sind und große Bedeutung haben.

In der Literatur wurde dieser Parameter auf unterschiedliche Art und Weise evaluiert. Einige Untersuchungen erhoben für den Parameter der Arbeitszeit die insgesamt benötigte Zeit für die Aufbereitung, welche die Zeit für das Wechseln der Instrumente sowie die Zeit für die Spülung des Wurzelkanals miteinbezieht [Schäfer und Lohmann 2002; Schäfer und Schlingemann 2003; Schäfer und Vlassis 2004; Schäfer et al. 2006; Schirrmeister et al. 2006]. Andere Studien hingegen ermittelten die reine Instrumentierungszeit, welches die aktive Zeit ist, die ein Instrument im Kanal arbeitet [Versümer et al. 2002; Hülsmann et al. 2003; Yun und Kim 2003; Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005; Veltri et al. 2005]. Eine Vergleichbarkeit der vorliegenden Studien hinsichtlich des Parameters Arbeitszeit wird durch die unterschiedlichen Aufbereitungssequenzen und -techniken erschwert, und hängt erheblich von der Erfahrung des Operators, seiner Vertrautheit mit dem jeweiligen Aufbereitungssystem sowie seiner manuellen Fertigkeit ab.

Eine Vielzahl von Studien, die manuelle und maschinelle Aufbereitungstechniken hinsichtlich ihrer benötigten Aufbereitungszeit evaluierten, verdeutlichen, dass nicht nur große Zeitvariationen bei den einzelnen Techniken bestehen, sondern auch zwischen den durchgeführten Studien.

Die Betrachtung bereits untersuchter NiTi-Systeme lässt erkennen, dass bei den Systemen sehr unterschiedliche Zeiten für die Aufbereitung von Wurzelkanälen benötigt

wurden [Yun und Kim 2003; Guelzow et al. 2005; Paqué et al. 2005; Schirrmeister et al. 2006]. Diese unterschiedlichen Aufbereitungszeiten sind natürlich von der Feilenanzahl des jeweiligen Systems und deren Aufbereitungssequenz sowie von den Konstruktionsmerkmalen der Instrumente abhängig. Jedoch ist auch zu erkennen, dass die Ergebnisse von Studie zu Studie variieren, unabhängig von dem verwendeten System. Die unterschiedlichen Untersuchungen zum rotierenden NiTi-System FlexMaster erlauben beispielsweise kaum einen Vergleich und eine Aussage hinsichtlich der Instrumentierungszeiten aufgrund der unterschiedlichen Anwendungstechniken. Ein Aspekt ist hierbei die unterschiedliche apikale Aufbereitungsgröße. Es zeigen sich Variationen von ISO 030 bis ISO 045, was zu einer voneinander abweichenden Instrumentenanzahl führt und veränderte Arbeitszeiten bedingt [Schäfer und Lohmann 2002; Hülsmann et al. 2003; Guelzow et al. 2005; Schirrmeister et al. 2006]. Weiterhin wird deutlich, dass FlexMaster in unterschiedlichen Aufbereitungssequenzen verwendet wird. In einigen Arbeiten wurde die Aufbereitungssequenz für enge Kanäle verwendet [Guelzow et al. 2005], andere Untersuchungen jedoch arbeiteten mit der Sequenz für weite Kanäle [Schirrmeister et al. 2006]. Diese Aufbereitungssequenzen beinhalten eine unterschiedliche Anzahl von Instrumenten, was wiederum die Arbeitszeiten beeinflusst. Dies verdeutlicht, dass ein Vergleich zwischen den Studien zum Teil kaum möglich oder erheblich erschwert ist.

Ein Vergleich zwischen der maschinellen Aufbereitungstechnik und der manuellen Aufbereitung ist ebenfalls durch die Anzahl der in den einzelnen Studien verwendeten Instrumente erschwert. Diese variiert je nach apikaler Aufbereitungsgröße und angewandter Technik zwischen vier bis acht Instrumenten [Schäfer und Lohmann 2002; Guelzow et al. 2005; Schirrmeister et al. 2006]. Auch hier steigt wie bei der maschinellen Aufbereitung mit zunehmender Feilenanzahl die benötigte Zeit zur Aufbereitung. Liegt die Zahl der anzuwendenden Feilen bei der manuellen Aufbereitung deutlich unter der maschinellen, dann benötigt die manuelle Aufbereitung weniger Zeit [Schirrmeister et al. 2006]. Ist die Feilenanzahl ungefähr gleich, dann sind die Resultate nicht mehr eindeutig. Es ist zum Teil eine reduzierte Arbeitszeit bei den rotierenden NiTi-Instrumenten erkennbar [Guelzow et al. 2005], jedoch konnte auch kein Unterschied zwischen den Aufbereitungstechniken gefunden werden [Schäfer und Schlingemann 2003; Schirrmeister et al. 2006]. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich in diese Beobachtungen einordnen. Die Aufbereitung der Wurzelkanäle mit den rotierenden NiTi-Instrumenten war der konventionellen manuellen Technik deutlich überlegen. Die Resultate zeigten weiterhin, dass ProTaper Universal mehr Zeit für die Bearbeitung des Kanales in Anspruch nahm im Vergleich zum Alpha-System. Ein Ansatzpunkt für die Erklärung liegt in der Anzahl der Instrumente. Bei der manuellen

Aufbereitung wurden acht Stahlfeilen verwendet, ProTaper Universal hingegen benötigte sieben und das Alpha-System mit fünf Feilen hatte die geringste Feilenanzahl.

6.2.4 Frakturrate

Die Arbeitssicherheit eines Aufbereitungssystems wird durch verschiedene Parameter bestimmt. Nicht nur Instrumentenfrakturen und Perforationen werden hierzu gezählt, sondern auch apikales Überstopfen von Debris, Verblockungen des Wurzelkanals, Stufenbildung, Überinstrumentierung, Verlust an Arbeitslänge und Abweichungen vom ursprünglichen Kanalverlauf müssen beachtet werden.

Als mögliche Ursachen für Instrumentenfrakturen werden neben der Erfahrung des Anwenders, einer unsachgemäßen Handhabung und zu häufigen Anwendungen des Instrumentariums Faktoren wie das Instrumentendesign, der Herstellungsprozess sowie die Wurzelkanalkonfiguration diskutiert [Mandel et al. 1999; Sattapan et al. 2000; Hülsmann et al. 2005; Parashos und Messer 2006].

In der Literatur finden sich nur wenige Angaben zu den auftretenden Frakturaten bei der maschinellen Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten unter klinischen Gesichtspunkten. Es liegen einige Studien vor, in denen man verwendete Wurzelkanalinstrumente rasterelektronenmikroskopisch evaluierte. *Sattapan et al.* untersuchte in einer Laborstudie 378 aussortierte, gebrauchte sowie frakturierte NiTi-Instrumente, welche in einer endodontisch orientierten Praxis in einem halben Jahr benutzt worden waren unter einem Elektronenmikroskop [Sattapan et al. 2000]. Die Ergebnisse zeigten, dass 50 % der verworfenen Feilen makroskopisch erkennbare Defekte aufwiesen, 28 % zeigten mikroskopisch sichtbare Läsionen, und 21 % waren bereits frakturiert. In einer weiteren Studie wurden in vier verschiedenen Ländern von 14 Endodontologen 7159 verworfene NiTi-Instrumente evaluiert [Parashos et al. 2004]. Die ermittelte Frakturrate betrug 5 %, wobei 1,5 % der Feilen einem Torsionsbruch und 3,5 % einem Ermüdungsbruch zugeordnet wurden. Sehr ähnliche Resultate zeigten die Ergebnisse einer anderen Untersuchung, in der man ebenfalls Instrumente nach ihrem klinischen Gebrauch analysierte und feststellte, dass 5 % der 822 evaluierten rotierenden NiTi-Instrumente aufgrund von Frakturen aussortiert wurden [Alapati et al. 2005]. Eine deutlich geringere Frakturrate wurde bei nur einmaliger Verwendung von rotierenden NiTi-Instrumenten beobachtet, jedoch sind bereits nach einmaligem Gebrauch Läsionen auf der Instrumentenoberfläche nachweisbar [Alapati et al. 2003; Arens et al. 2003]. Die Ergebnisse einer Untersuchung zeigten insgesamt sieben Frakturen bei 786 einmalig verwendeten Instrumenten, was einer Rate von 0,9 % entspricht [Arens et al. 2003].

In klinischen Untersuchungen traten bei der Verwendung von rotierenden NiTi-Instrumenten Frakturraten zwischen 0,4 % bis 3,7 % auf [Ramirez-Salomon et al. 1997; Al-Fouzan 2003; Schäfer et al. 2004; Iqbal et al. 2006; Parashos und Messer 2006]. Dabei zeigten in einer retrospektiven klinischen Studie über vier Jahre (von 2000 bis 2004) bei einer Betrachtung von 4865 endodontischen Behandlungen 81 Instrumente eine Fraktur [Iqbal et al. 2006]. Die Frakturrate lag mit 1,68 % (69 Instrumente) für die rotierenden NiTi Feilen sieben mal höher. Die Autoren schlossen aus den Ergebnissen, dass das Auftreten von Instrumentenbrüchen bei dieser Untersuchung mit 1,66 % als gering einzustufen ist und die NiTi-Instrumente eine größere Tendenz zur Fraktur aufweisen. Die Frakturaten bei Edelstahlfeilen für die konventionelle manuelle Aufbereitung bewegen sich *in vivo* unter 2 % und scheinen hinsichtlich ihrer Bruchanfälligkeit im Größenbereich der NiTi-Instrumente zu liegen [Schäfer et al. 2004; Iqbal et al. 2006].

Bei häufigem Gebrauch steigt das Risiko eines Ermüdungsbruches von Instrumenten [Gambarini 2001], die oft im apikalen Wurzelkanaldrittel frakturieren [Al-Fouzan 2003; Iqbal et al. 2006; Parashos und Messer 2006]. Die häufigsten Instrumentenbrüche kommen bei der Aufbereitung von Molaren vor, an Prämolaren und Frontzähnen waren weitaus weniger Brüche zu verzeichnen [Iqbal et al. 2006]. Weitere Laboruntersuchungen beschäftigten sich mit der Zeitspanne, bis zu der ein Ermüdungsbruch für einzelne Instrumententypen in Abhängigkeit der Wurzelkanalkrümmung auftrat. Nicht nur mit Verkleinerung des Krümmungsradius des Wurzelkanales nahm das Risiko eines Ermüdungsbruches zu; vielmehr verringert sich mit zunehmendem Instrumentendurchmesser auch der Anwendungszeitraum bis zur zyklischen Ermüdung [Pruett et al. 1997; Haikel et al. 1999; Ullmann und Peters 2005]. Größere Feilen brechen somit eher aufgrund einer Materialermüdung, was auf die übermäßige Wechselbelastung aus Kompression und Distraction zurückzuführen ist. Die Grenze der Belastbarkeit ist umso schneller erreicht, je stärker ein Kanal gekrümmt ist.

Insgesamt liegen die in der Literatur angegebenen Frakturaten von Wurzelkanalinstrumenten unter klinischen Bedingungen unabhängig vom verwendeten Instrumentarium unter 5 %. Die vermutete, deutlich höhere Frakturrate bei den NiTi-Instrumenten aufgrund ihrer materialtechnischen Eigenschaften konnte nicht bestätigt werden, wobei nur wenige In-vivo-Untersuchungen zu den Edelstahlinstrumenten vorliegen. Zu berücksichtigen ist, dass zur Vermeidung von Torsionsbrüchen immer ein drehmomentkontrollierter Motor verwendet wurde und die Behandler aufgrund ihrer Spezialisierung im Bereich der Endodontologie über ausgeprägte Erfahrungen verfügten.

In der vorliegenden Arbeit war weder bei den Edelstahlfeilen für den manuellen Einsatz, noch bei den maschinell angewendeten NiTi-Instrumenten eine Fraktur nach einmaligem Gebrauch der Instrumente zu verzeichnen. Diese Resultate werden von einer Untersuchung aus dem Jahr 2003 bestätigt, die rotierende NiTi-Instrumente nach ihrem einmaligen Gebrauch hinsichtlich auftretender Defekte untersuchte und eine Frakturrate der Instrumente von 0,9 % ermittelte [Arens et al. 2003]. Dennoch ist die Vergleichbarkeit eingeschränkt, da es sich um eine *in vivo* Untersuchung handelte und eine wesentlich größere Probenanzahl (768 Kanäle) vorlag.

Die klinische Bedeutsamkeit der Ergebnisse der vorliegenden Studie ist mit Zurückhaltung zu betrachten, da die Instrumente nur einmal verwendet wurden und der Fokus schwerpunktmäßig auf der Formgebung sowie der mechanischen Reinigungswirkung lag. In allen Untersuchungen zur Vermeidung von Instrumentenbrüchen wird neben der Verwendung eines drehmomentangetriebenen Motors, eine ausreichende Übung und Erfahrung des Anwenders mit dem System empfohlen. Weiterhin ist die richtige Anwendung des Instrumentariums, wie zum Beispiel die Schaffung eines Gleitpfades, ein druckloses Arbeiten der Feilen, das Einhalten der Anwendungshäufigkeit unter Beachtung der Kanalgeometrie, von größter Bedeutung.

7. Schlussfolgerungen

Die Instrumentierungszeit sowie die Parameter apikale Wurzelkanalbegradigung und Anteil an verbleibender nicht instrumentell bearbeiteter Wurzelkanalwand wurden signifikant vom verwendeten Aufbereitungssystem beeinflusst. Weder die Anwendung des neu entwickelten Alpha-Systems, noch das weiterentwickelte ProTaper Universal konnten bestehende Aufbereitungsprobleme vollständig eliminieren, jedoch waren Unterschiede zwischen den Systemen zu verzeichnen. Im Vergleich zu ProTaper Universal und der manuellen Aufbereitung mit Stahlfeilen war das Alpha-System hinsichtlich Formgebung, mechanischer Reinigungswirkung und Arbeitszeit diesen beiden überlegen.

Unbearbeitete Wurzelkanalanteile verblieben im koronalen, zentralen sowie apikalen Wurzelkanalbereich bei allen Systemen. Die Evaluierung einzelner Wurzelkanalquerschnitte hinsichtlich unbearbeiteter Bereiche ist kein Parameter der Reinigungswirkung, sondern erlaubt nur Rückschlüsse auf die Komponente der mechanischen Säuberung durch ein System.

Die Oberflächenbehandlung von NiTi-Instrumenten verfolgt das Ziel, die Härte der Schneiden zu erhöhen und die Oberflächengüte, verbunden mit einer gesteigerten Schneidleistung sowie einer geringeren Abnutzung, zu verbessern. Die Instrumente des Alpha-Systems weisen eine PVD-Oberflächenbehandlung mit einer Titan-Nitrid-Beschichtung auf und waren in der vorliegenden Arbeit bei der Formgebung den anderen Systemen überlegen. Welchen Einfluss jedoch diese Beschichtung unabhängig von den Konstruktionsmerkmalen auf die Schneidleistung hat, sollte in weiteren Arbeiten untersucht werden. Auch der Effekt der behandelten Oberfläche auf die Verschleißfestigkeit konnte in dieser Studie durch die einmalige Verwendung nur unzureichend geklärt werden und erfordert weitere Untersuchungen.

Alle Aufbereitungssysteme zeichneten sich aufgrund fehlender Frakturen durch eine hohe Arbeitssicherheit aus. Die klinische Relevanz der Ergebnisse ist aufgrund der nur einmaligen Anwendung jedes Instrumentes mit Zurückhaltung zu betrachten.

8. Zusammenfassung

Problemstellung: Rotierende NiTi-Systeme mit unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen wurden mit dem Ziel entwickelt, die Aufbereitung des Wurzelkanals unter Erhaltung der Kanalgeometrie zu verbessern. Aufbereitungsbedingte Fehler konnten jedoch bisher nicht vollständig eliminiert werden und signifikante Unterschiede zwischen den Systemen traten auf. Mit der Maßgabe, diese Problematik in der Aufbereitung weiter zu reduzieren, werden stetig neue NiTi-Systeme auf dem Dentalmarkt vorgestellt und unterliegen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung.

Zielsetzung: Das Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die apikale Begradigung gekrümmter Wurzelkanäle in verschiedenen Ebenen, die mechanische Reinigungswirkung sowie die Instrumentierungszeit und Frakturrate nach Aufbereitung mit zwei rotierenden NiTi-Systemen zur manuellen Technik mit Stahlfeilen zu vergleichen.

Material und Methoden: 45 extrahierte humane Unterkiefermolaren mit mesial gekrümmter Wurzel wurden trepaniert, exstirpiert und sondiert. Nach Einbettung in ein Muffelsystem erfolgte pro Zahn mit einem inserierten Reamer (ISO-Größe 010) die Anfertigung einer standardisierten Röntgenaufnahme in vestibulo-oraler (A) sowie in mesio-distaler (B) Ebene. Auf diese Weise konnten computergestützt die initialen Krümmungswinkel der Wurzelkanäle per Winkelmessung (Axio Vision) bestimmt und die Proben je nach Krümmungsgrad gleichmäßig auf drei Gruppen (n = 15) verteilt werden. Mit einer Innenlochsäge wurden anschließend die Proben in 3, 6 und 9 mm Abstand zum Apex horizontal zerschnitten und die Kanalquerschnitte mit einem Stereoauflichtmikroskop fotografiert. Die Aufbereitung der Kanäle bis zu einer apikalen Masterfeile der ISO-Größe 030 wurde mit den NiTi-Systemen ProTaper Universal (Dentsply) und Alpha-System (Komet) nach Herstellerangaben sowie manuell mit Stahlfeilen (VDW) durchgeführt. Nach der apikalen Erweiterung mit den Feilen der ISO-Größen 025 sowie 030 erfolgte jeweils die Anfertigung von digitalen Röntgenbildern in den Ebenen A und B mit einem inserierten Instrument der entsprechenden Größe und erneut die Bestimmung der Krümmungswinkel. Über die resultierenden Winkeldifferenzen konnten anschließend etwaige Begradigungen ermittelt werden. Nach Beendigung der Aufbereitung wurden die bearbeiteten Wurzelkanalquerschnitte erneut fotografiert, computergestützt halbtransparent übereinandergelagert (Corel Draw) und der prozentuale Anteil an nicht instrumentell bearbeiteter Kanalwandzirkumferenz in den einzelnen Abschnitten (koronal, zentral, apikal) ermittelt (Axio Vision). Darüber hinaus wurden die Instrumentierungszeit und die Frakturrate bestimmt.

Ergebnisse: Die Begradigung nach ISO-Größe 025 und 030 wurde in beiden Ebenen signifikant vom verwendeten System beeinflusst ($p < 0,05$; Kuskall-Wallis-H-Test). Das Alpha-System wies signifikant geringere Begradigungen im Vergleich zu ProTaper Universal sowie der Handaufbereitung auf ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test), wohingegen letztere sich nicht signifikant unterschieden ($p > 0,05$; Mann-Whitney-U-Test). Der Anteil an nicht bearbeiteter Wurzelkanalwand wurde nur im apikalen Wurzelkanalabschnitt signifikant vom verwendeten System beeinflusst ($p < 0,05$; Kuskall-Wallis-H-Test). Die manuelle Aufbereitung führte verglichen mit dem Alpha-System zu signifikant mehr unbearbeiteten Bereichen ($p < 0,05$; Chi-Quadrat-Test), unterschied sich jedoch nicht signifikant zu ProTaper Universal ($p > 0,05$; Chi-Quadrat-Test). Die Instrumentierungszeit [\bar{x} (SD)] mit dem Alpha-System [103,2 (13,5) s] war signifikant kürzer als mit ProTaper Universal [150,7 (18,9) s], welches wiederum signifikant weniger Zeit benötigte verglichen mit der Handaufbereitung [238,3 (35,1) s] ($p < 0,05$; Tukey-B). Bei keinem System traten Frakturen auf.

Schlussfolgerungen: Die Begradigung der Wurzelkanäle sowie das Verbleiben unbearbeiteter Bereiche in allen Wurzelkanalabschnitten konnte bei der Verwendung der untersuchten NiTi-Systeme nicht vermieden werden; jedoch zeigten sich Unterschiede zwischen den Systemen. Im Vergleich zu ProTaper Universal und der manuellen Aufbereitung mit Stahlfeilen scheint das Alpha-System hinsichtlich Formgebung, mechanischer Reinigungswirkung und Arbeitszeit diesen beiden überlegen zu sein. Die Instrumentierungszeit war im Vergleich zur Handaufbereitung reduziert.

Schlagwörter:

maschinelle Wurzelkanalaufbereitung, Nickel-Titan-Instrumente, Formgebung, Arbeitszeit

Klinische Bedeutung:

Die Ergebnisse der vorliegenden In-vitro-Untersuchung verdeutlichen, dass bisher bestehende Probleme bei der Aufbereitung eines Wurzelkanals mit neueren Aufbereitungssystemen verringert werden, jedoch nicht vollständig eliminiert werden können. Der apikale Wurzelkanalabschnitt bleibt die kritische Region während der Aufbereitung und für die Erzielung einer guten Reinigungswirkung ist eine ausgiebige chemische Desinfektion während einer Wurzelkanalbehandlung nötig.

9. Abstract

Statement of problem: Several rotary nickel-titanium (NiTi) instruments with different configurations and designs have been developed with the aim to reduce preparation time and to simplify preparation procedure. Studies about cleaning and shaping ability, working time and safety have shown that NiTi instruments could not entirely eliminate canal transportation. NiTi instruments revealed equal or even lesser results concerning cleaning effectiveness when compared with stainless steel hand instruments. The aim of the present study was to investigate the instrumentation time, the working safety and the shaping ability of two rotary NiTi systems (Alpha System and ProTaper Universal) in comparison to stainless steel hand instruments.

Materials and methods: A total of 45 mesial root canals of extracted human mandibular molars were selected. Based on the determined degree of curvature the matched teeth were allocated randomly into three groups of 15 teeth each. In group 1 root canals were prepared to size 30 using a standardized manual preparation technique; in group 2 and 3 rotary NiTi instruments were used following the manufacturers' instructions. Instrumentation time and procedural errors were recorded. With the aid of pre- and post-operative radiographs, apical straightening of the canal curvature was determined. Photographs of the coronal, middle, and apical cross-sections of the pre- and post-operative canals were taken and superimposed using a standard software. By analysing these composite images the portion of uninstrumented canal walls was evaluated.

Results: Active instrumentation time of the Alpha-System was significantly reduced compared to ProTaper Universal and hand instrumentation ($p < 0,05$; Tukey-B). No instrument fractures occurred in any of the groups. The Alpha-System revealed significantly less apical straightening compared to the other instruments ($p < 0,05$; Mann-Whitney U test). In the apical cross-sections Alpha-System resulted in significantly less non-instrumented canal walls compared to stainless steel files ($p < 0,05$; chi-squared test).

Conclusion Despite the demonstrated differences between the systems, the experimental results suggest that none of the rotary NiTi systems was able to impede an apical straightening effect during the root canal preparation; areas of uninstrumented root canal wall were left in all regions using the various systems.

Keywords:

automated root canal preparation, NiTi instruments, root canal shaping, working time

Clinical Significance:

Rotary NiTi instruments were comparable of improving the root canal shaping compared to stainless steel hand instruments. Nevertheless, the apical third of the root canal remains the critical area and the need of an efficient chemical irrigation to clean the root canals effectively is clearly warranted.

10. Literaturverzeichnis

1. Ahlquist M, Henningsson O, Hultenby K, Ohlin J: The effectiveness of manual and rotary techniques in the cleaning of root canals: a scanning electron microscopy study. *Int Endod J*, 2001; 34: 533-537
2. Alapati SB, Brantley WA, Svec TA, Powers JM, Mitchell JC: Scanning electron microscope observations of new and used nickel-titanium rotary files. *J Endod*, 2003; 29: 667-669
3. Alapati SB, Brantley WA, Svec TA, Powers JM, Nusstein JM, Daehn GS: SEM observations of nickel-titanium rotary endodontic instruments that fractured during clinical Use. *J Endod*, 2005; 31: 40-43
4. Al-Fouzan KS: Incidence of rotary ProFile instrument fracture and the potential for bypassing in vivo. *Int Endod J*, 2003; 36: 864-867
5. Arens FC, Hoen MM, Steiman HR, Dietz GC, Jr.: Evaluation of single-use rotary nickel-titanium instruments. *J Endod*, 2003; 29: 664-666
6. Bartha T, Kalwitzki M, Lost C, Weiger R: Extended apical enlargement with hand files versus rotary NiTi files. Part II. Oral surgery, Oral medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics, 2006; 102: 692-697
7. Bechelli C, Zecchi Orlandini S, Colafranceschi M: Scanning electron microscope study on the efficacy of root canal wall debridement of hand versus Lightspeed instrumentation. *Int Endod J*, 1999; 32: 484-493
8. Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P: Mechanical root canal preparation with NiTi rotary instruments: rationale, performance and safety. Status report for the American Journal of Dentistry. *American Journal of Dentistry*, 2001; 14: 324-333
9. Berutti E, Chiandussi G, Gaviglio I, Ibba A: Comparative analysis of torsional and bending stresses in two mathematical models of nickel-titanium rotary instruments: ProTaper versus ProFile. *J Endod*, 2003; 29: 15-19
10. Berutti E, Negro AR, Lendini M, Pasqualini D: Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *J Endod*, 2004; 30: 228-230
11. Biz MT, Figueiredo JA: Morphometric analysis of shank-to-flute ratio in rotary nickel-titanium files. *Int Endod J*, 2004; 37: 353-358
12. Bramante CM, Berbert A, Borges RP: A methodology for evaluation of root canal instrumentation. *Journal of Endodontics*, 1987; 13: 243-245
13. Brockhurst P, Hsu E: Hardness and strength of endodontic instruments made from NiTi alloy. *Australian Endodontic Journal*, 1998; 24: 115-119
14. Calberson FL, Deroose CA, Hommez GM, De Moor RJ: Shaping ability of ProTaper nickel-titanium files in simulated resin root canals. *International Endodontic Journal*, 2004; 37: 613-623
15. Calhoun G, Montgomery S: The effects of four instrumentation techniques on root canal shape. *J Endod*, 1988; 14: 273-277
16. Campos JM, del Rio C: Comparison of mechanical and standard hand instrumentation techniques in curved root canals. *Journal of Endodontics*, 1990; 16: 230-234
17. Card SJ, Sigurdsson A, Orstavik D, Trope M: The effectiveness of increased apical enlargement in reducing intracanal bacteria. *J Endod*, 2002; 28: 779-783
18. Chuste-Guillot MP, Badet C, Peli JF, Perez F: Effect of three nickel-titanium rotary file techniques on infected root dentin reduction. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 2006; 102: 254-258
19. Craig RG, McIlwain ED, Peyton FA: Bending and torsion properties of endodontic instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1968; 25: 239-254

20. Cunningham CJ, Senia ES: A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars. *J Endod*, 1992; 18: 294-300
21. da Silva FM, Kobayashi C, Suda H: Analysis of forces developed during mechanical preparation of extracted teeth using RaCe rotary instruments and ProFiles. *Int Endod J*, 2005; 38: 17-21
22. Dederich DN, Zakariasen KL: The effects of cyclical axial motion on rotary endodontic instrument fatigue. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1986; 61: 192-196
23. Diemer F, Calas P: Effect of pitch length on the behavior of rotary triple helix root canal instruments. *J Endod*, 2004; 30: 716-718
24. Eldeeb ME, Boraas JC: The effect of different files on the preparation shape of severely curved canals. *Int Endod J*, 1985; 18: 1-7
25. ESE: Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J*, 2006; 39: 921-930
26. Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S, Breschi L, Malagnino VA, Prati C: SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments. *International Endodontic Journal*, 2004; 37: 832-839
27. Gambarini G: Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after prolonged clinical use. *Int Endod J*, 2001; 34: 386-389
28. Gambarini G, Laszkiewicz J: A scanning electron microscopic study of debris and smear layer remaining following use of GT rotary instruments. *Int Endod J*, 2002; 35: 422-427
29. Gambill JM, Alder M, del Rio CE: Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *J Endod*, 1996; 22: 369-375
30. Guelzow A, Stamm O, Martus P, Kielbassa AM: Comparative study of six rotary nickel-titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation. *International Endodontic Journal*, 2005; 38: 743-752
31. Haapasalo M, Orstavik D: In vitro infection and disinfection of dentinal tubules. *J Dent Res*, 1987; 66: 1375-1379
32. Haikel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C: Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*, 1999; 25: 434-440
33. Hartmann MS, Barletta FB, Camargo Fontanella VR, Vanni JR: Canal transportation after root canal instrumentation: a comparative study with computed tomography. *Journal of Endodontics*, 2007; 33: 962-965
34. Hübscher W, Barbakow F, Peters OA: Root-canal preparation with FlexMaster: canal shapes analysed by micro-computed tomography. *Int Endod J*, 2003; 36: 740-747
35. Hülsmann M: Zur Geschichte der Wurzelkanalaufbereitung. *Endodonie*, 1996; 5: 97-112
36. Hülsmann M: Entwicklung einer Methodik zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichende In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. 1. Aufl., Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin 2000
37. Hülsmann M, Gambal A, Bahr R: An improved technique for the evaluation of root canal preparation. *Journal of Endodontics*, 1999; 25: 599-602
38. Hülsmann M, Gressmann G, Schäfers F: A comparative study of root canal preparation using FlexMaster and HERO 642 rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J*, 2003; 36: 358-366
39. Hülsmann M, Herbst U, Schäfers F: Comparative study of root-canal preparation using Lightspeed and Quantec SC rotary NiTi instruments. *Int Endod J*, 2003; 36: 748-756
40. Hülsmann M, Peters OA, Dummer MH: Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics*, 2005; 10: 30-76
41. Hülsmann M, Stryga F: Comparison of root canal preparation using different automated devices and hand instrumentation. *Journal of Endodontics*, 1993; 19: 141-145

42. Ingle JI: A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1961; 14: 83-91
43. Iqbal MK, Kohli MR, Kim JS: A retrospective clinical study of incidence of root canal instrument separation in an endodontics graduate program: a PennEndo database study. *J Endod*, 2006; 32: 1048-1052
44. Kuhn G, Jordan L: Fatigue and mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*, 2002; 28: 716-720
45. Lee DH, Park B, Saxena A, Serene TP: Enhanced surface hardness by boron implantation in Nitinol alloy. *J Endod*, 1996; 22: 543-546
46. Leseberg DA, Montgomery S: The effects of Canal Master, Flex-R, and K-Flex instrumentation on root canal configuration. *J Endod*, 1991; 17: 59-65
47. Li UM, Lee BS, Shih CT, Lan WH, Lin CP: Cyclic fatigue of endodontic nickel titanium rotary instruments: static and dynamic tests. *J Endod*, 2002; 28: 448-451
48. Lim KC, Webber J: The effect of root canal preparation on the shape of the curved root canal. *Int Endod J*, 1985; 18: 233-239
49. Lim SS, Stock CJ: The risk of perforation in the curved canal: anticurvature filing compared with the stepback technique. *Int Endod J*, 1987; 20: 33-39
50. Loushine RJ, Weller RN, Hartwell GR: Stereomicroscopic evaluation of canal shape following hand, sonic, and ultrasonic instrumentation. *J Endod*, 1989; 15: 417-421
51. Mandel E, Adib-Yazdi M, Benhamou LM, Lachkar T, Mesgouez C, Sobel M: Rotary Ni-Ti profile systems for preparing curved canals in resin blocks: influence of operator on instrument breakage. *Int Endod J*, 1999; 32: 436-443
52. McCann JT, Keller DL, LaBounty GL: A modification of the muffle model system to study root canal morphology. *J Endod*, 1990; 16: 114-115
53. Meyer W: Die Anatomie der Wurzelkanäle, dargestellt an mikroskopischen Rekonstruktionsmodellen. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1970; 25: 1064-1077
54. Miserendino LJ, Miserendino CA, Moser JB, Heuer MA, Osetek EM: Cutting efficiency of endodontic instruments. Part III. Comparison of sonic and ultrasonic instrument systems. *J Endod*, 1988; 14: 24-30
55. Orstavik D, Haapasalo M: Disinfection by endodontic irrigants and dressings of experimentally infected dentinal tubules. *Endod Dent Traumatol*, 1990; 6: 142-149
56. Paqué F, Barbakow F, Peters OA: Root canal preparation with Endo-Eze AET: changes in root canal shape assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J*, 2005; 38: 456-464
57. Paqué F, Musch U, Hülsmann M: Comparison of root canal preparation using RaCe and ProTaper rotary Ni-Ti instruments. *International Endodontic Journal*, 2005; 38: 8-16
58. Parashos P, Gordon I, Messer HH: Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *J Endod*, 2004; 30: 722-725
59. Parashos P, Messer HH: Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *Journal of Endodontics*, 2006; 32: 1031-1043
60. Patino PV, Biedma BM, Liebana CR, Cantatore G, Bahillo JG: The influence of a manual glide path on the separation rate of NiTi rotary instruments. *J Endod*, 2005; 31: 114-116
61. Peters OA: Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *Journal of Endodontics*, 2004; 30: 559-567
62. Peters OA, Laib A, Rueggegger P, Barbakow F: Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res*, 2000; 79: 1405-1409
63. Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow F: ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. *Int Endod J*, 2003; 36: 86-92

64. Peters OA, Schonenberger K, Laib A: Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *International Endodontic Journal*, 2001; 34: 221-230
65. Prati C, Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S: Appearance of the root canal walls after preparation with NiTi rotary instruments: a comparative SEM investigation. *Clinical Oral Investigations*, 2004; 8: 102-110
66. Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL, Jr.: Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*, 1997; 23: 77-85
67. Ramirez-Salomon M, Soler-Bientz R, de la Garza-Gonzalez R, Palacios-Garza CM: Incidence of Lightspeed separation and the potential for bypassing. *J Endod*, 1997; 23: 586-587
68. Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Condorelli GG, Torrisi L: Wear of nickel-titanium endodontic instruments evaluated by scanning electron microscopy: effect of ion implantation. *J Endod*, 2001; 27: 588-592
69. Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Fragalk I, Condorelli GG: The effect of surface treatments of nickel-titanium files on wear and cutting efficiency. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2000; 89: 363-368
70. Roland DD, Andelin WE, Browning DF, Hsu GH, Torabinejad M: The effect of preflaring on the rates of separation for 0.04 taper nickel titanium rotary instruments. *J Endod*, 2002; 28: 543-545
71. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH: Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod*, 2000; 26: 161-165
72. Schäfer E: Effects of four instrumentation techniques on curved canals: a comparison study. *J Endod*, 1996; 22: 685-689
73. Schäfer E: Effect of physical vapor deposition on cutting efficiency of nickel-titanium files. *Journal of Endodontics*, 2002; 28: 800-802
74. Schäfer E: Effect of sterilization on the cutting efficiency of PVD-coated nickel-titanium endodontic instruments. *Int Endod J*, 2002; 35: 867-872
75. Schäfer E, Dzepina A, Danesh G: Bending properties of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 2003; 96: 757-763
76. Schäfer E, Erler M, Dammaschke T: Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J*, 2006; 39: 196-202
77. Schäfer E, Erler M, Dammaschke T: Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *International Endodontic Journal*, 2006; 39: 203-212
78. Schäfer E, Fritzenschaft B: Vergleichende Untersuchung zweier permanent rotierender Wurzelkanalaufbereitungssysteme auf Nickel-Titan-Basis. *Endodontie*, 1999; 3: 222
79. Schäfer E, Lohmann D: Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile--Part 2. Cleaning effectiveness and instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth. *International Endodontic Journal*, 2002; 35: 514-521
80. Schäfer E, Oitzinger M: Cutting efficiency of five different types of rotary nickel-titanium instruments. *Journal of Endodontics*, 2008; 34: 198-200
81. Schäfer E, Schlingemann R: Efficiency of rotary nickel-titanium K3 instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J*, 2003; 36: 208-217
82. Schäfer E, Schulz-Bongert U, Tulus G: Comparison of hand stainless steel and nickel titanium rotary instrumentation: a clinical study. *Journal of Endodontics*, 2004; 30: 432-435

83. Schäfer E, Tepel J: Relationship between design features of endodontic instruments and their properties. Part 3. Resistance to bending and fracture. *Journal of Endodontics*, 2001; 27: 299-303
84. Schäfer E, Vlassis M: Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments: ProTaper versus RaCe. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J*, 2004; 37: 229-238
85. Schäfer E, Vlassis M: Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments: ProTaper versus RaCe. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J*, 2004; 37: 239-248
86. Schilder H: Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am*, 1974; 18: 269-296
87. Schirrmeister JF, Strohl C, Altenburger MJ, Wrbas KT, Hellwig E: Shaping ability and safety of five different rotary nickel-titanium instruments compared with stainless steel hand instrumentation in simulated curved root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 2006; 101: 807-813
88. Schrader C, Peters OA: Analysis of torque and force with differently tapered rotary endodontic instruments in vitro. *J Endod*, 2005; 31: 120-123
89. Sen BH, Piskin B, Demirci T: Observation of bacteria and fungi in infected root canals and dentinal tubules by SEM. *Endod Dent Traumatol*, 1995; 11: 6-9
90. Sonntag D, Ott M, Kook K, Stachniss V: Root canal preparation with the NiTi systems K3, Mtwo and ProTaper. *Australian Endodontic Journal*, 2007; 33: 73-81
91. Southard DW, Oswald RJ, Natkin E: Instrumentation of curved molar root canals with the Roane technique. *J Endod*, 1987; 13: 479-489
92. Spyropoulos S, Eldeeb ME, Messer HH: The effect of Giromatic files on the preparation shape of severely curved canals. *Int Endod J*, 1987; 20: 133-142
93. Sydney GB, Batista A, de Melo LL: The radiographic platform: a new method to evaluate root canal preparation in vitro. *J Endod*, 1991; 17: 570-572
94. Tepel J, Schäfer E, Hoppe W: Kunststoffe als Modellmaterial in der Endodontie. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1993; 48: 736-738
95. Thompson SA: An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J*, 2000; 33: 297-310
96. Turpin YL, Chagneau F, Bartier, Cathelineau G, Vulcain JM: Impact of torsional and bending inertia on root canal instruments. *J Endod*, 2001; 27: 333-336
97. Turpin YL, Chagneau F, Vulcain JM: Impact of two theoretical cross-sections on torsional and bending stresses of nickel-titanium root canal instrument models. *Journal of Endodontics*, 2000; 26: 414-417
98. Ullmann CJ, Peters OA: Effect of cyclic fatigue on static fracture loads in ProTaper nickel-titanium rotary instruments. *J Endod*, 2005; 31: 183-186
99. Veltri M, Mollo A, Mantovani L, Pini P, Balleri P, Grandini S: A comparative study of Endoflare-Hero Shaper and Mtwo NiTi instruments in the preparation of curved root canals. *Int Endod J*, 2005; 38: 610-616
100. Versümer J, Hülsmann M, Schäfers F: A comparative study of root canal preparation using Profile .04 and Lightspeed rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J*, 2002; 35: 37-46
101. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H: An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod*, 1988; 14: 346-351
102. Weiger R, Bartha T, Kalwitzki M, Lost C: A clinical method to determine the optimal apical preparation size. Part I. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 2006; 102: 686-691
103. Weine FS, Kelly RF, Lio PJ: The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape. *Journal of Endodontics*, 1975; 1: 255-262

104. Weine FS, Kelly RF, Lio PJ: The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape. *J Endod*, 1975; 1: 255-262
105. Wu MK, van der Sluis LW, Wesselink PR: The capability of two hand instrumentation techniques to remove the inner layer of dentine in oval canals. *International Endodontic Journal*, 2003; 36: 218-224
106. Wu MK, Wesselink PR: Efficacy of three techniques in cleaning the apical portion of curved root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 1995; 79: 492-496
107. Yao JH, Schwartz SA, Beeson TJ: Cyclic fatigue of three types of rotary nickel-titanium files in a dynamic model. *J Endod*, 2006; 32: 55-57
108. Yoshimine Y, Ono M, Akamine A: The shaping effects of three nickel-titanium rotary instruments in simulated S-shaped canals. *Journal of Endodontics*, 2005; 31: 373-375
109. Yun HH, Kim SK: A comparison of the shaping abilities of 4 nickel-titanium rotary instruments in simulated root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 2003; 95: 228-233

11. Anhang

11.1 Abkürzungsverzeichnis

EDTA	Ethylendiamintetraacetessigsäure
ISO	International Standard Organisation
NiTi	Nickel-Titan
Nitinol	Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory
PVD	Physical Vapour Deposition
SPSS	Statistical Package for Social Sciences

11.2 Liste der verwendeten Materialien

Mat.1	Alpha Glide; Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG; Lemgo, Deutschland
Mat.2	AxioVision; Version 4.6.3, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Jena, Deutschland
Mat.3	Corel Draw; Version 12, Corel Corporation; Unterschleißheim, Deutschland
Mat.4	EDTA File care; VDW GmbH, München, Deutschland
Mat.5	Hedströmfeilen (ISO-Größe 010 bis 030); VDW GmbH, München, Deutschland
Mat.6	Mikroschleifsystem Exakt 400 CS; Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland
Mat.7	Nagellack; Betrix, Frankfurt/Main, Deutschland
Mat.8	Natriumchlorid 0,9 % Lösung; Fresenius Kabi Deutschland GmbH, Bad Homburg, Deutschland
Mat.9	Natriumhypochlorit-Lösung 1%; Aug. Hedinger GmbH & Co.KG
Mat.10	Objektträger; diaplus, Oststeinbeck, Deutschland
Mat.11	Papierspitzen; Roeko, Coltène/Whaledent GmbH &Co. KG, Langenau, Deutschland
Mat.12	Planmeca intra; Planmeca GmbH; Hamburg, Deutschland
Mat.13	Reamer (ISO-Größe 010 bis 030); VDW GmbH, München, Deutschland
Mat.14	Sägemikrotom Leitz 1600; Leica Microsystem AG, Wetzlar, Deutschland
Mat.15	Sekundenkleber; Henkel, Düsseldorf, Deutschland
Mat.16	SPSS 14.0 für Windows; SPSS GmbH, München, Deutschland
Mat.17	Stoppuhr; www.jumk.de/stoppuhr , Internetservice Kummer + Oster GbR, Buchenberg, Deutschland
Mat.18	Technovit 4071; Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland

11.3 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei denjenigen zu bedanken, die mir während der gesamten Zeit zur Seite gestanden haben und ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. A. M. Kielbassa, für die Überlassung des interessanten Promotionsthemas. Besonders möchte ich mich bei ihm für sein fachlich äußerst kompetentes und stets sehr motivierendes Engagement bedanken, was wesentlich zu meinem beruflichen und zu meinem persönlichen Werdegang beigetragen hat.

Meiner Kollegin Frau Dr. Kerstin Bitter danke ich ganz herzlich für die stetige und geduldige Unterstützung. Mit zahlreichen wertvollen Hinweisen und Ratschlägen sowie konstruktiven Diskussionen hat sie wesentlich zu der erfolgreichen Umsetzung der Arbeit beigetragen.

Herrn Michael Stiebritz und Herrn Rainer Toll danke ich für die Hilfestellung und fachlichen Anregungen während der Arbeiten im Labor.

Für die Unterstützung bei der Erfassung der Daten sowie bei deren statistischen Auswertung möchte ich Herrn Dr. K. Neumann danken.

Bei den Firmen Dentsply Maillefer, Komet und VDW möchte ich mich für die Bereitstellung der Materialien bedanken.

Nicht zuletzt danke ich ganz herzlich meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung das Zahnmedizinstudium und weiterhin die Durchführung dieser Dissertation ermöglicht haben. Sie standen mir die gesamte Zeit zur Seite und haben mich immer mit Rat und Tat unterstützt. Ohne ihre Stütze wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen Eltern widme ich von ganzem Herzen diese Dissertationsschrift.

11.4 Lebenslauf

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."

11.5 Eidesstattliche Erklärung

„Ich, Juliane Vaudt, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: ‘Der Effekt rotierender Nickel-Titan Systeme auf die Wurzelkanalgeometrie im Vergleich zur manuellen Aufbereitung mit Edelstahlfeilen. Eine In-vitro-Untersuchung’ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Datum: 13. Oktober 2009

Unterschrift